

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки**

(повна назва інституту/факультету)

**Кафедра електронних приладів та пристроїв**

(повна назва кафедри)

**«До захисту допущено»**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Л.Д. Писаренко  
“    ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Дипломний проект**

**освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр»**

(назва ОКР)

з спеціальності : **6.050802- Електронні пристрої та системи**

Спеціалізація: **Електронні прилади та пристрої**

на тему: Метаматеріал з підстроюванням для технології СТЕЛС

**Виконав:**

студент IV курсу, гр. ДЕ-51

\_\_\_\_\_ **Леоненко Олексій Миколайович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ **професор, д.т.н., доц. Кузьмичев А. І.**

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Консультанти:**

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ **доцент, к.т.н., доц. Чадюк В. О.**

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_ **професор каф. МЕ, к.т.н., доц. Орлов А. Т.**

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2019

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет                      Е л е к т р о н і к и  
Кафедра                      Електронні прилади та пристрої  
Освітньо-кваліфікаційний рівень: Бакалавр  
Спеціальність: 6.050802 – Електронні пристрої та системи  
Спеціалізація : Електронні прилади та пристрої

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.  
\_\_\_\_\_ Л.Д.Писаренко  
«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

на дипломний проект студенту

**Леоненко Олексій Миколайович**

**1. Тема проекту «Метаматеріал з підстроюванням для технології СТЕЛС»**

і керівник проекту **Кузьмичєв Анатолій Іванович, професор.**

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ р., № \_\_\_\_\_

**2. Строк подання студентом проекту «\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ р.**

**3. Вихідні дані до проекту:** резонансні частоти – 3 ГГц, 15 ГГц, 26 ГГц; кут падіння випромінення  $0^\circ - 90^\circ$  для 3 ГГц, і  $30^\circ - 60^\circ$  для 15 і 26 ГГц; коефіцієнт відбиття – 0,1 – 1.

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:** Анотація; вступ; огляд науково-технічної літератури по підходам до реалізації технології та методам підстроювання; розрахунок геометричних розмірів частотно-селективної поверхні; дослідження та розрахунок параметрів поверхні; розробка складальних креслень для; технологія виготовлення частотно-селективних поверхонь; висновки; перелік використаної науково-технічної літератури.

**5. Перелік графічного матеріалу:** складальні креслення; плакати з рисунками, графіками та формулами.

**7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_**

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури про підходи до реалізації поверхонь та методів їх підстроювання		
2	Розрахунок та моделювання частотно-селективної поверхні на основі метаматеріалів.		
3	Дослідження методів щодо реалізації підстроювання розрахованої поверхні		
4	Розробка складального креслення поверхні		
5	Дослідження технологія виготовлення поверхні		
6	Оформлення пояснювальної записки, креслення, плакатів з формулами та графіками, підготовка доповіді		

Студент гр. ДЕ-51 \_\_\_\_\_ **О.М. Леоненко**

Керівник проекту \_\_\_\_\_ **А.І. Кузьмичєв**

№ з/п	Формат	Позначення			Найменування			Кількість	Примітка
1	A4				Завдання на дипломний проект			1	
2	A4	БР.6.050802.051.011 ПЗ			Пояснювальна записка			73	
3	A1	БР.6.050802.051.011.01 СК			Складальне креслення			1	
4	A1	БР.6.050802.051.011.02 СК			Складальне креслення			1	
					Плакати з результатами розрахунків, графіками та формулами			2	
					БР.6.050802.051.011 ВДП				
Зм.	Арк.	П.І.Б.	Підп.	Дата					
Розроб.	Леоненко О.				Метаматеріал з підстроюванням для технології СТЕЛС Відомість дипломного проекту		Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірів	Кузьмичев А.							1	1
							«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПП, гр. ДЕ-51		
Н.контр.	Чадюк В.О.								
Затверд.	Писаренко Л.								

# **ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

**до дипломного проекту**

на тему: «**Метаматеріал з підстроюванням для технології**  
**СТЕЛС**»

Київ – 2019

## РЕФЕРАТ

### Електронна система моніторингу життєвих показників людини

Дипломний проект освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» спеціальності 6.050802- Електроніка, спеціалізації – Електронні прилади та пристрої. Леоненка Олексія Миколайовича. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Факультет електроніки, кафедра «Електронні прилади та пристрої». Група ДЕ-51. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.

**Ключові слова:** frequency-selective surfaces, metamaterials, Stealth technology, cloaking.

**Короткий зміст роботи:** В дипломному проекті було проведено огляд науково-технічної літератури на тему метаматеріалів, частотно-селективних поверхонь, поверхонь з підстроюванням та методами застосування даних технологій у сфері СТЕЛС.

Було оглянуто 4 різні методи реалізації маскування за допомогою частотно-селективних поверхонь, а також було досліджено методи щодо підстроювання даних поверхонь задля розширення їх способів застосування. Було показано перспективи використання даних технологій у низці сфер, від побутової до військової. Було проведено огляд технологій конструювання 2D і 3D поверхонь з різними резонансними частотами і розмірами.

Було приведено результати розрахунку геометричних розмірів частотно-селективних поверхонь в залежності від заданих характеристик. А також було запропоновано методи щодо підстроювання розрахованих поверхонь.

Робочі параметри частотно-селективних поверхонь, за якими були розраховані геометричні розміри:

- Резонансними частотами – 3 ГГц, 15 ГГц, 26 ГГц;
- Кутом падіння випромінювання  $0^{\circ}$  -  $90^{\circ}$  для 3 ГГц, і  $30^{\circ}$  –  $60^{\circ}$  для 15 і 26 ГГц;
- Коефіцієнтом відбиття – 0,1 – 1.

## АНОТАЦІЯ

В дипломному проекті було проведено огляд науково-технічної літератури на тему метаматеріалів, частотно-селективних поверхонь, поверхонь з підстроюванням та методами застосування даних технологій у сфері СТЕЛС.

Було оглянуто 4 різні методи реалізації маскування за допомогою частотно-селективних поверхонь, а також було досліджено методи щодо підстроювання даних поверхонь задля розширення їх способів застосування. Було показано перспективи використання даних технологій у низці сфер, від побутової до військової. Було проведено огляд технологій конструювання 2D і 3D поверхонь з різними резонансними частотами і розмірами.

Було приведено результати розрахунку геометричних розмірів частотно-селективних поверхонь в залежності від заданих характеристик. А також було запропоновано методи щодо підстроювання розрахованих поверхонь.

Робочі параметри частотно-селективних поверхонь, за якими були розраховані геометричні розміри:

- Резонансними частотами – 3 ГГц, 15 ГГц, 26 ГГц;
- Кутом падіння випромінення  $0^\circ$  -  $90^\circ$  для 3 ГГц, і  $30^\circ$  –  $60^\circ$  для 15 і 26 ГГц;
- Коефіцієнтом відбиття – 0,1 – 1.

# S U M M A R Y

The diploma project reviewed the scientific and technical literature on metamaterials, frequency-selective surfaces, surfaces with tuning and methods of applying these technologies in the STEALTH field.

Four different methods of cloaking which are created using frequency-selective surfaces were examined, and methods for tuning these surfaces were investigated in order to expand their methods of application. The prospects of using these technologies in a number of spheres, from domestic to military, were shown. An overview of the technologies of constructing 2D and 3D surfaces with different resonance frequencies and sizes was reviewed.

The results of calculating the geometric sizes of frequency-selective surfaces were given, depending on the given characteristics. Also, methods for adjusting the calculated surfaces were proposed.

Working parameters of frequency-selective surfaces on which the geometric dimensions were calculated:

- Resonant frequencies - 3 GHz, 15 GHz, 26 GHz;
- The incident angle -  $0^\circ$  to  $90^\circ$  for 3 GHz, and  $30^\circ$  to  $60^\circ$  for 15 and 26 GHz;
- The reflection coefficient – 0,1 - 1.



# ЗМІСТ

РЕФЕРАТ .....	1
АНОТАЦІЯ .....	2
SUMMARY .....	3
ЗМІСТ .....	4
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	6
ВСТУП .....	7
1 ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	9
1.1 Поняття метаматеріалів та СТЕЛС .....	9
1.2 Початок розвитку технології метаматеріалів .....	10
1.3 Різні підходи до створення метаповерхонь з підстроюванням .....	12
1.4 Конвенційні методи невидимості .....	14
1.4.1 Сферичне маскування на основі електродинаміки трансформації. ....	14
1.4.2 Неевклідове трансформаційне маскування .....	19
1.4.3 Килимове маскування (carpet cloaking) .....	20
1.4.4 Мантійне маскування (mantle cloaking) .....	23
1.4.5 Порівняння технологій .....	25
1.5 Способи підстроювання частотно-селективної поверхні .....	28
1.5.1 Вступ .....	28
1.5.2 Підстроювання на основі MEMS структури .....	29
1.5.1 Підстроювання з використанням плазми .....	33
Висновки до розділу 1 .....	37
2 РОЗРАХУНОК ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНОЇ ПОВЕРХНІ.....	38
2.1 Вступ.....	38
2.2 Теорія розрахунку ЧСП .....	39

					БР.171.051.011 ПЗ				
Змн	Арк	№ докум	Підпис	Дата					
Розроб		Леоненко О.			Метаматеріал з підстроюванням для технології СТЕЛС				
Перевір		Кузьмичев А.І.							
Реценз.									
Н. Контр.		Чадюк В.О.							
Затверд		Писаренко Л.							
					Літ	Арк	Архівів		
							4		73
					«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПП, гр. ДЕ-51				

2.3 Моделювання і розрахунок ЧСП.....	42
2.4 Залежність від кута падіння .....	44
2.5 Контроль коефіцієнта відбиття.....	47
2.6 Контроль ширини смуги пропускання.....	52
2.7 Моделювання ЧСП з підстроюванням на основі MEMS структури .....	54
2.8 Моделювання ЧСП з підстроюванням на основі PIN діодів .....	55
Висновки до розділу 2 .....	57
3 ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУЮВАННЯ МЕТАМАТЕРІАЛІВ .....	58
3.1 Технологія конструювання одношарових метаматеріалів .....	58
3.2 Технологія конструювання багатошарових метаматеріалів.....	62
Висновки до розділу 3 .....	67
ВИСНОВКИ.....	68
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	69

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
						5
Змн	Анк	№ докum.	Піппис	Лата		

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЧСП – частотно-селективна поверхня

RP – relative permittivity – відносна діелектрична проникність

MP – magnetic permeability, магнітна проникність

LH – left-handed

NRI – Negative Refractive Index, негативний показник заломлення

SRR – split-ring resonator, резонатор у вигляді кільця з вирізом

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
						6
Змн	Анк	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Методи контролю електромагнітного випромінення використовуються людством майже у кожній сфері – від побуду до військової техніки. За допомогою них можливо передавати сигнал у заданому напрямку, «вибирати» необхідний сигнал з середовища, чи навіть ізолювати його. Найяскравіший приклад використання даної технології – мікрохвильова піч. В ній встановлений екран, який дозволяє дивитись у піч, але захищає людей від її 2,45 ГГц випромінювання. Також ця технологія може бути використана для ізоляції WiFi сигналів у великих будівлях. Ще одна популярна сфера використання – військова техніка. При використанні частотно-селективних поверхонь на основі метаматеріалів можливо замаскувати від радіолокаторів військову техніку. Також, теоретично, можливо створити так званий «плащ-невидимку».

Це може бути досягнуто за допомогою метаматеріалів, які мають надприродні властивості, завдяки їх специфічній конструкції. Зародження технології метаматеріалів відбулося відносно недавно – у 1967 році, і відразу людство помітило корисність цієї технології. До сих пір вчені досліджують різні конструкції метаматеріалів, і кожна з них має унікальні характеристиками.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
						7
Змн	Анк	№ докum.	Пілпис	Лата		

Також варто відзначити важливість підстроювання метаматеріалів. Базова частотно-селективна поверхня на основі метаматеріалу пасивна, і оперує на деякій заданій частоті. На даний час, можливість зміни резонансної частоти та коефіцієнту відбиття без зміни геометричних розмірів – наступний крок у розвитку цієї технології. До підстроювання ЧСП є також декілька підходів. Буде досліджено підстроювання на основі MEMS структури і плазми.

Дана робота присвячена розрахунку частотно-селективної поверхні в залежності від потрібних параметрів:

- Резонансними частотами – 3 ГГц, 15 ГГц, 26 ГГц;
- Кутом падіння випромінення  $0^\circ$  -  $90^\circ$  для 3 ГГц, і  $30^\circ$  –  $60^\circ$  для 15 і 26 ГГц;
- Коефіцієнтом відбиття – 0,1 – 1.

Також будуть представлені технологічні особливості щодо конструювання 2D та 3D частотно-селективних поверхонь на основі вже досліджених прикладів. Метою цієї роботи є дослідження видів частотно-селективних поверхонь, методів їх підстроювання та способів їх застосування для технології СТЕЛС.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
						8
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД НАУКОВО ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

## 1.1 Поняття метаматеріалів та СТЕЛС

Пристрій для маскуванння - це технологія невидимості (Stealth), яка може призвести до того, що об'єкти, такі як літаки або особи, будуть частково або повністю невидимими для частин електромагнітного (ЕМ) спектру. Люди використовували цей принцип ще з давніх давен, ховаючись у кущах під час полювання.

Наукові дослідження показують, що пристрої для маскуванння в реальному світі можуть приховати об'єкти від щонайменше однієї довжини хвилі ЕМ поля. Вчені вже використовують штучні матеріали, названі метаматеріалами, щоб змінити випромінювання навколо об'єкта.

Метаматеріал (від грецького слова *μετά* meta, що означає "за межами" і латинське слово *materia*, що означає "матерія" або "матеріал") - це матеріал, створений таким чином, щоб мати властивість, яка не існує в природних матеріалах. Вони виготовляються із збірок безлічі елементів, виготовлених з композитних матеріалів, таких як метали або пластмаси. Матеріали, як правило, розташовані в повторюваних послідовностях, на шкалах, розміром менші за довжини хвиль явищ, на які вони впливають.

За допомогою метаматеріалів можливо створити поверхні з підстроюванням, які можуть бути використані і у інших сферах. Такі поверхні можуть бути використані також у побуті. Хорошим комерційним застосуванням є дверцята мікрохвильової печі у типовій кухні. На них прикріплений екран, що складається з періодичного масиву металевих отворів, призначених для відбиття енергії НВЧ при 2,45 ГГц [1]. При цьому, ця поверхня пропускає світло, що дозволяє користувачеві бачити, як їжа готується всередині печі.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
						9
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		

## 1.2. Початок розвитку технології метаматеріалів

Пошук кораблів, літаків і т.д. здійснюється за допомогою електромагнітних хвиль. Радіолокаційна станція встановлює контакт з об'єктом і отримує інформацію про його форму і положення. Саме через це потрібно було створити системи протидії цьому явищу - так звані захисні покриття. Розповсюдження електромагнітних хвиль у просторі характеризується коефіцієнтом заломлення  $n$ :

$$n = \pm\sqrt{\varepsilon\mu} \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  - відносна діелектрична проникність і  $\mu$  - магнітна проникність (МР). У рівнянні (1) знаки  $\pm$  вказують на загальний характер рівняння.

Існує чотири можливі комбінації пари  $(\varepsilon, \mu)$  -  $(+, +)$ ,  $(+, -)$ ,  $(-, +)$  і  $(-, -)$ , як показано на рис. 1. Перші три комбінації можуть бути знайдені в природі, а остання  $[(-, -)]$  (left-handed, або матеріали Веселаго) - ні.

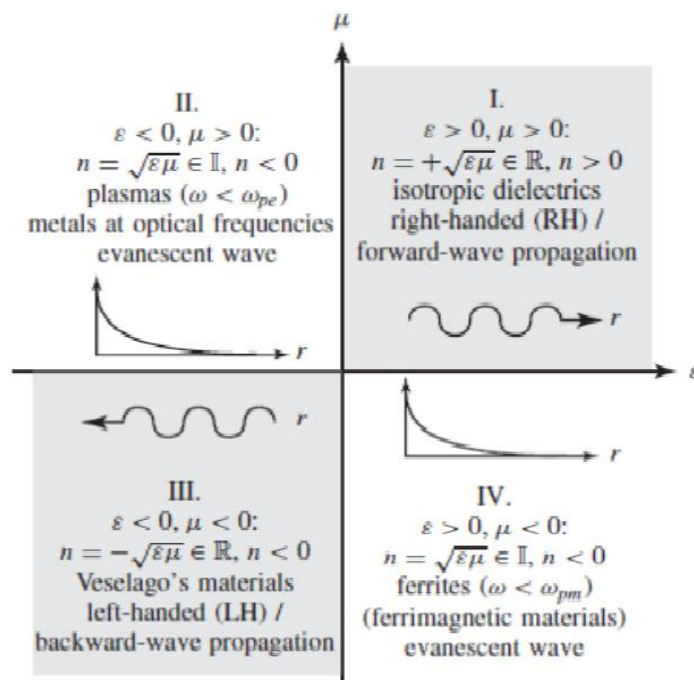


Рис. 1.1. Можливі комбінації пари  $(\varepsilon, \mu)$  [1]

ЛН (left-handed) матеріали в результаті негативних компонентних параметрів характеризуються антипаралельними фазовими і груповими

швидкостями і негативним показником заломлення (Negative Refractive Index) [«-» в рівнянні (1)].

Структурно матеріали Веселаго є метаматеріалами, за визначенням, оскільки вони є штучні, ефективно однорідні і мають надзвичайно незвичайні властивості ( $\epsilon_r, \mu_r < 0$ ). Структури LH, безсумнівно, є найпоширенішими метаматеріалами, через відмінні властивості негативного показника заломлення.

Ідея LH матеріалів (LHM) була викладена російським вченим Віктором Веселаго 1967 року (на основі праць Л.І. Мандельштама), як і можливе існування матеріалів, а також їх унікальні електромагнітні властивості.

Хоча Веселаго передбачав існування метаматеріалів, їх експериментальне створення відбулося три десятиліття пізніше дослідницькою групою в Каліфорнійському університеті (Каліфорнійський університет, Сан-Дієго, UCSD). Їх матеріал Веселаго складався з резонаторів мідних кілець (резонатори Split-Ring, SRR) і тонких мідних дротів, які призвели до негативної проникності і діелектричної проникності відповідно. Інша дослідницька група з MIT (Массачусетський технологічний інститут) повторила вищеописаний експеримент, підтверджуючи спостереження Каліфорнійського університету.

Саме після цього почався бурхливий розвиток технології метаматеріалів.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		11



### 1.3 Різні підходи до створення метаповерхонь з підстроюванням

Загальні матеріали, утворені зарядженими частинками, які взаємодіють з електромагнітними хвилями, за своєю природою виявляються за допомогою електромагнітного випромінювання. Ми відчуваємо це кожен раз, коли дивимося на об'єкт: причиною, чому наші очі можуть бачити об'єкт, є те, що він відображає або розсіює частину навколишнього світла, що вражає його поверхню, і наша сітківка може виявити частину цієї розсіяної хвилі. Такий же принцип застосовується в радіолокаційних системах, які виявляють розсіювання радіочастотного сигналу, що поширюється на невідомий об'єкт. Для того, щоб зробити об'єкт повністю невидимим, необхідно відмінити будь-яке розсіювання з нього або, іншими словами, поширення електромагнітних хвиль має бути однаковим незалежно від того, чи є цей об'єкт чи ні. Звідси випливає, що нам необхідно модифікувати взаємодію об'єкта з електромагнітними хвилями шляхом сполучення його з відповідною інженерною системою, присутність якої впливає на природну сигнатуру розсіювання об'єкта, скасовуючи його. Це є задачею поверхні для маскування.

Залежно від цільового застосування, вимоги до таких поверхонь є більш-менш жорсткими. У випадку невидимості для людського ока, наприклад, робоча пропускна здатність повинна охоплювати видимий спектр, але оскільки людське око нечутливе до фази або поляризації світла, не має значення, чи буде збережена хвильова фаза або поляризація, в той час як найбільш важливими величинами для збереження є напрямок поширення, частота і інтенсивність. В інших застосуваннях, для яких відомо напрямок падаючого освітлення, скасування розсіювання для всіх кутів не вимагається, що може спростити конструкцію поверхні. Деякі інші застосування не вимагають великої пропускної здатності; наприклад, маскуючі приймальні антени вимагають поверхні з тією ж смугою пропускання, що і антена. У будь-якому випадку, найважливішими метриками для плаців є (1) величина

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
						12
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		

скорочення розсіювання, спричинена плащем і його кутовою залежністю (картина розсіювання), і (2) смуга пропускання, тобто смугу частот, над якою видимість об'єкта зводиться до того, що звичайні датчики не можуть його виявити.

Протягом останнього століття наукові співтовариства досліджували проблеми, пов'язані з маскуванням. Ці дослідження показують, що маскування може бути теоретично можливим, оскільки всі вони описують можливість наявності поляризованих тіл, які не розсіюються. Проте нам довелося чекати розвитку галузі метаматеріалів за останні 15 років, щоб побачити значний прорив у науці і техніці невидимості. Але завдяки своїм перевершеним можливостям хвильової маніпуляції метаматеріали зробили невидимість на один крок ближче до реальності.

Метою цієї роботи є аналіз стану досліджень у сфері невидимості та маскування, а також дослід перспектив на її майбутнє. У роботі розглядаються найбільш популярні доступні методи скасування електромагнітного розсіювання з об'єкта.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		13

## 1.4 Конвенційні методи невидимості

Для того, щоб створити основу для аналізу і бачення, буде проаналізовано основні методи, за допомогою яких можливо викликати невидимість об'єкта до електромагнітних хвиль за допомогою метаматеріалів. Також будуть описані основні проблеми, пов'язані з пасивними методами маскування, які були розроблені протягом останнього десятиліття.

### 1.4.1 Сферичне маскування на основі електродинаміки трансформації

Маскування на основі електродинаміки трансформації - це метод маскування (*cloaking*), який використовує концепцію електродинаміки трансформації для керування потоком електромагнітної енергії з використанням координатних перетворень, які деформують координатну сітку простору, як на рис. 2. Ідея починається з розгляду світла, що поширюється вздовж лінії у вільному просторі, як на рис. 2 (а). Якщо уявити собі, що ми маємо здатність згинати і розтягувати координату сітку простору, то, згідно з принципом Ферма, ми можемо повністю змінити шлях променів і перенаправити їх, як показано на рис. 2 (б).

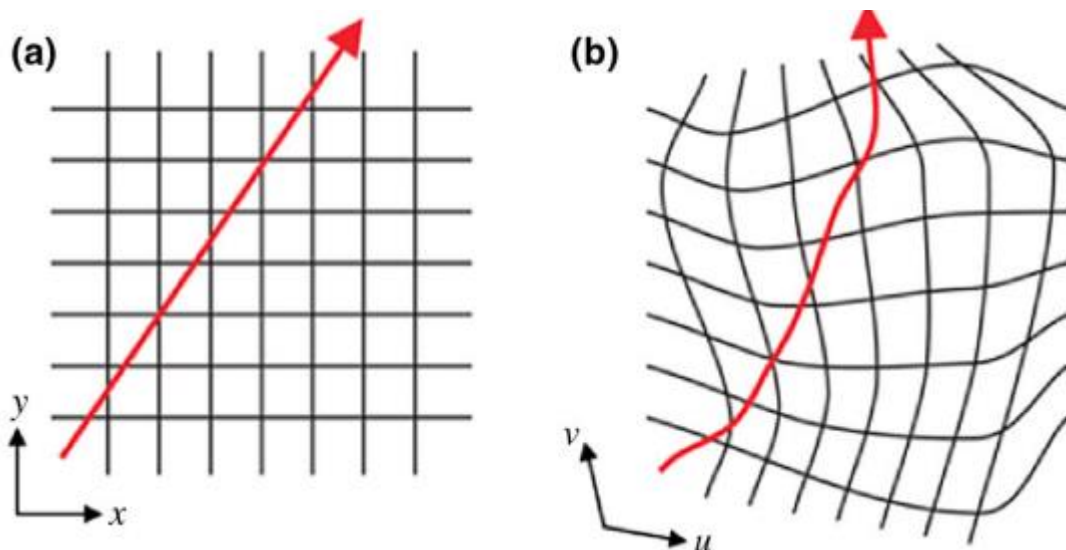


Рис. 1.2. Координатні перетворення можуть бути використані для маніпулювання шляхом світла [2].

Через формування інваріантності рівняння Максвелла при перетворенні координат можна інтерпретувати поширення світла в трансформованій системі координат як поширення в нетрансформованій системі, але заповненій деяким середовищем, що містить специфічні неоднорідні та анізотропні розподіли проникності та провідності.

Згідно з електродинамікою перетворення, якщо б ми могли побудувати середовище з такими конститутивними параметрами, ми б змусили світло слідувати наміченим криволінійним координатам. Метаматеріали, які забезпечують повне локальне керування своїми конститутивними параметрами, можуть бути ідеальною платформою для реалізації оптики перетворення в реальних пристроях.

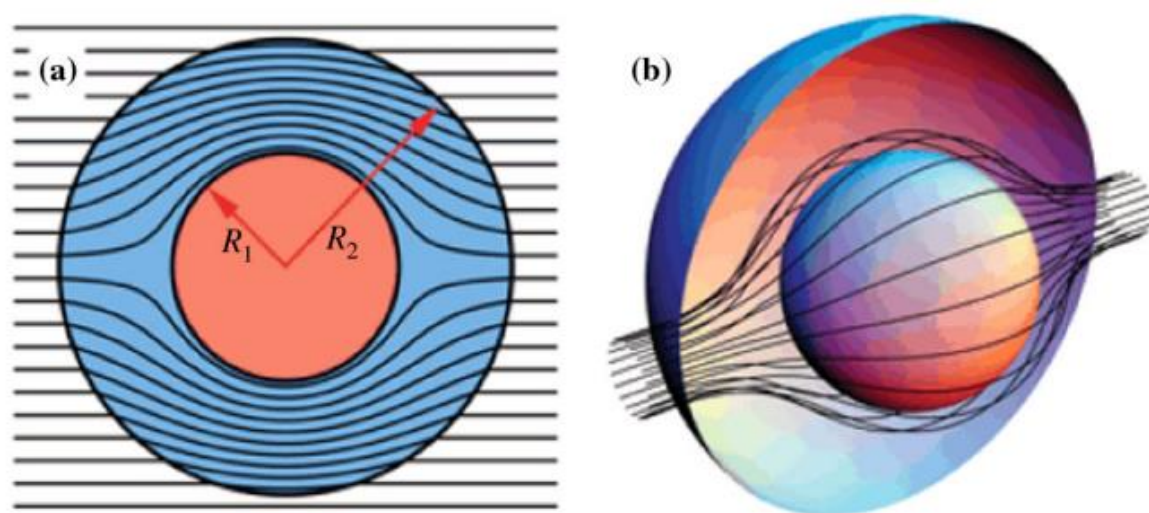


Рис. 1.3. Сферичне маскування на основі трансформації. [2]

Можливість застосувати трансформаційну електродинаміку до проблеми маскування добре встановлена і задокументована в літературі [2]. Для цього потрібно знайти координатну трансформацію, яка б перенаправляла потік енергії навколо сферичної області простору, в яку розміщується об'єкт, який потрібно приховати. Трансформаційно-електродинамічні рівняння можуть автоматично забезпечувати необхідну конструкцію плаща. Можливим перетворенням є те, яке приймає сферичну область радіуса  $R_2$  і відображає його внутрішній сферичний об'єм у сферичну оболонку внутрішнього радіуса

$R_1$  і зовнішній радіус  $R_2$ . Результат перетворення полягає в основному для перетворення вільного простору в кривий простір з отвором в ньому [рис. 3 (a)]. Після імітації цього перетворення за допомогою метаматеріалів ми отримаємо область фактичного фізичного простору, повністю ізольовану від електромагнітних хвиль, в якій ми можемо приховати довільний об'єкт. Оскільки об'єкт не може бути досягнутий за допомогою електромагнітної енергії, він не може бути поляризований, і тому не може розсіюватися. За своєю суттю, енергетичний потік просто йде навколо прихованої області і продовжує свій шлях, наче на його шляху нічого не має [Рис. 3 (b)].

Наприклад, використовуючи радіальне перетворення  $r' = R_1 + r(R_2 - R_1) / R_1$  отримаємо наступні конститутивні параметри тензора для мантиї в області  $R_1 < r < R_2$  [2]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{rr} = \mu_{rr} &= \frac{R_2}{R_2 - R_1} \frac{(r - R_1)^2}{r^2}, \\ \varepsilon_{\theta\theta} = \mu_{\theta\theta} &= \frac{R_2}{R_2 - R_1}, \\ \varepsilon_{\phi\phi} = \mu_{\phi\phi} &= \frac{R_2}{R_2 - R_1}.\end{aligned}\tag{2}$$

З рівняння (2), ми бачимо, що магнітний та електричний відгук для поверхні повинен бути однаковим. Це зроблено для гарантії узгодження імпедансу з фоном у корпусі маскування, щоб забезпечити відсутність відображення і відсутність розсіювання від самої поверхні.

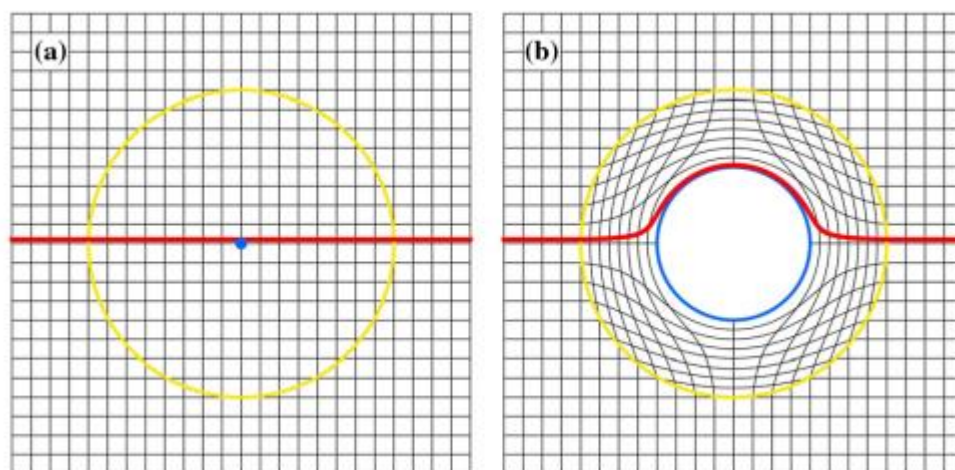


Рис. 1.4. Відмінності в довжині шляху у вільному просторі (а) і всередині поверхні (б), що натякає на надсвітлове поширення. [2]

Це також гарантує, що реакція розсіювання не залежить від поляризації падаючого поля, що робить об'єкт невидимим незалежно від поляризації освітлення. Відзначимо також, що необхідні конститутивні параметри є анізотропними і залежать від радіальної координати  $r$ : цей складний відгук не можна уникнути, оскільки необхідно емулювати криволінійні системи координат. Нарешті, зауважимо, що значення радіальної складової конститутивних параметрів на межі  $R_1$  маскуючої області повинно бути дорівнює нулю. Це можна зрозуміти, розглядаючи променеву картину на рис. 4, яка показує, як світловий промінь, що наближається до початку (синя точка) у нетрансформованій системі координат [рис. 4 (а)] має пересуватися на більшу відстань у трансформованій системі координат і ще не відчувати затримки фази. Така поведінка вимагає, щоб цей промінь подорожував швидше, ніж швидкість світла, і в межі критичного променя, що перетинає початок, необхідна фазова швидкість повинна йти до нескінченності, що відповідає нульовому значенню конститутивних параметрів у формулі. (1). У будь-якому пасивному, причинному, лінійному і незалежному від часу матеріалі, згідно з відносинами Крамерса-Кроніга, це може відбуватися тільки на ізольованих частотах, що передбачає сильну частотну дисперсію.

Враховуючи складні матеріальні вимоги, такий сферичний плащ може стати складним завданням для виготовлення і має власні недоліки. По-перше,

анізотропію і функціональну залежність конститутивних параметрів важко отримати на практиці навіть з метаматеріалами. По-друге, магнітний відгук поверхні повинен бути рівним його електричному відгуку, однак сильного магнітного відгуку важко досягти, особливо в діапазоні оптичних частот, що перешкоджає застосуванню концепції на високих частотах. Нарешті, розповсюдження в надсвітловому середовищі (потреба у фазовій швидкості, що перевищує швидкість світла), що вимагається в поверхні, означає, що концепція може ідеально працювати тільки над нульовою мірою, тобто тільки на одній частоті.

Тим не менш, можливість згинати потік енергії навколо об'єкта і приховати його від електромагнітного випромінювання експериментально продемонстрували на мікрохвильових частотах Schurig et al. [3], в частотному діапазоні, в якому можуть бути досягнуті сильні магнітні реакції. Конструкція спрощена, враховуючи лише одну поляризацію і використовуючи ейкональну апроксимацію, яка розслаблює обмеження на радіальну залежність параметрів поверхні за рахунок введення деякої невідповідності і відбитків від поверхні. Така конструкція робить маскування недосконалим, однак, вона підтримує профіль траєкторії променя, що є достатнім для доказу концепції та згинання впливу потужності навколо об'єкта. На рис. 5 показана картина електромагнітної поверхні, випробуваної в цьому експерименті, конструкція якого заснована на резонаторах з розщепленим кільцем з спеціальною радіальною залежністю.

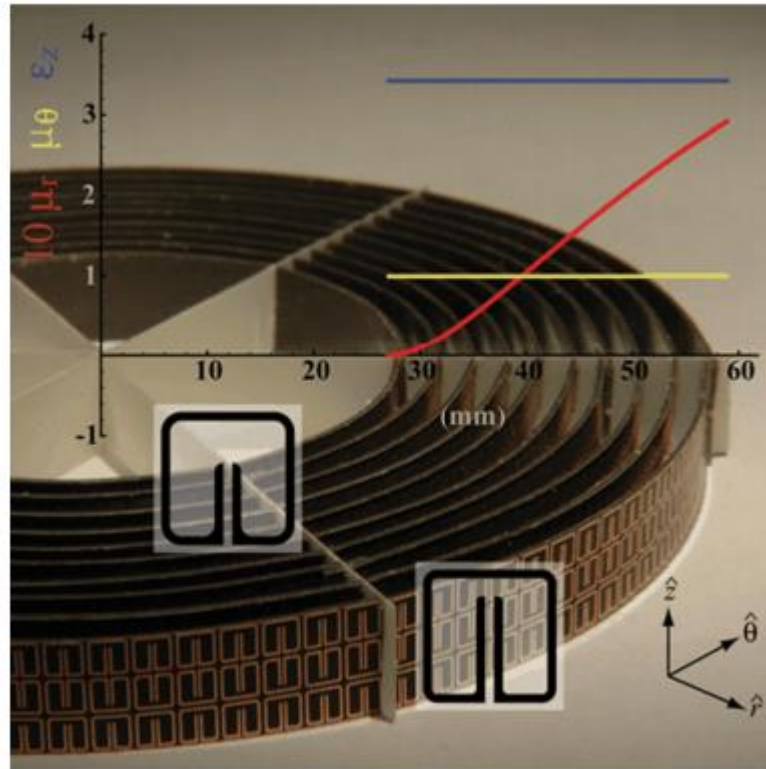


Рис. 1.5. Електромагнітна поверхня з метаматеріалів на основі перетворення електродинаміки на мікрохвильових частотах [3].

Сферичний «плащ» трансформації є елегантним способом досягнення невидимості, однак його застосовність обмежена двома основними недоліками: (1) необхідністю надсвітлового поширення світла в поверхні, що різко обмежує смугу маскування, і (2) складність необхідних конститутивних параметрів, зокрема, сильна необхідна анізотропія і рівний електричний і магнітний відгук. Ці питання можуть бути вирішені в деяких конкретних ситуаціях за допомогою різних методів маскування: електродинаміки нееквідіальної трансформації, яка вирішує проблему (i), жертвуючи фазою хвилі; килимове маскування (*carpet cloaking*) та його варіанти, які вирішують проблему (ii), але не працюють для вільно стоячих об'єктів або для всіх кутів; і плазмонне маскування, яке вирішує проблему (ii), але обмежується об'єктами з розмірами, порівнянними з довжиною хвилі. Тепер будуть описані ці інші схеми маскування та їх основні характеристики.



### 1.4.2 Неевклідове трансформаційне маскування

Неевклідова електродинаміка перетворення є методикою, запропонованою Леонгардтом і Тіком [4], які запропонували використовувати неевклідові перетворення (наприклад, відображення області фізичного простору на поверхню сфери), щоб уникнути особливостей у необхідних пласко-конститутивних параметрах. Метод може бути використаний для того, щоб повністю позбутися від вимоги до надсвітлового поширення. Через це, маскування може бути в принципі зроблено широкосмуговим. Основний недолік цієї технології в тому, щоб отримати пропускну здатність, зробили так що плащ не зберігає фазу падаючої хвилі, на відміну від ідеального сферичного плаща, описаного в попередньому розділі, тобто об'єкт може стати видимим за допомогою вимірювання часу-прожектора або інтерферометричних методів. Зауважимо, однак, що, оскільки людське око не чутливе до фази, цей компроміс не може бути практичною проблемою, навіть якщо інтерференційні ефекти все ще можуть зробити об'єкт виявленим, як обговорюється в роботі [4]. До теперішнього часу не повідомляється про експериментальну перевірку цієї концепції, ймовірно, тому, що висока складність практичних конструкцій, зумовлена необхідними анізотропними і конститутивними параметрами плащ, все ще залишається непомітною; однак це лише технологічний виклик, і метод є перспективним рішенням для широкосмугової невидимості.

### 1.4.3 Килимове маскування (carpet cloaking)

Інший цікавий підхід, що значно спрощує необхідні параметри для СТЕЛС поверхні, був запропонований Лі і Пендрі [5], які ввели метод, заснований на електродинаміці двовимірного квазіконформального перетворення. Вони показали, що певні типи перетворень можуть бути досягнуті з використанням тільки матеріалів з діелектриком, реальними значеннями діелектричної проникності та слабкими формами анізотропії. Приклад такого перетворення показаний на рис. 6, на якому цей спосіб

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
						20
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		

використовується для того, щоб зробити дзеркало з горбом абсолютно рівним, покриваючи горб мантиєю килима, також відомої як плащ земної площини (ground-plane cloak).

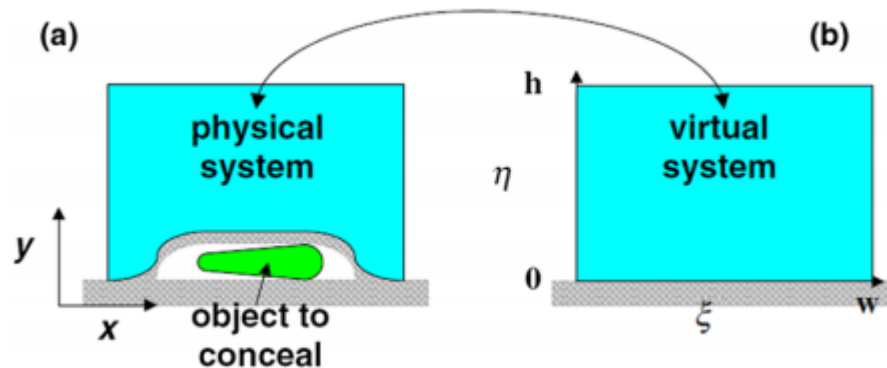


Рис. 1.6. Килимове маскування використовує перетворення координат щоб зробити дзеркало з виїмкою плоским. [5]

Синя область фігури являє собою обсяг, за яким застосовується перетворення, тоді як сіра область являє собою ідеальні електричні провідники, тобто ідеальні дзеркала. Усередині горба будь-який об'єкт може бути прихований. Метод маскування спирається на знаходження трансформації, що робить дзеркало плоским, як показано на малюнку, даючи необхідний неоднорідний розподіл індексу для плаща земної площини. На рис. 7 показаний результат повного хвильового моделювання для розсіювання Гауссового пучка дзеркалом з трикутною шийкою, з і без мантиї.

Пучок відбивається, як якщо б дзеркало було плоским в присутності плаща, роблячи горб істотно невидимим. Численні експерименти продемонстрували концепцію від мікрохвильових частот до оптичних частот, отримуючи маскування в широкому діапазоні частот.

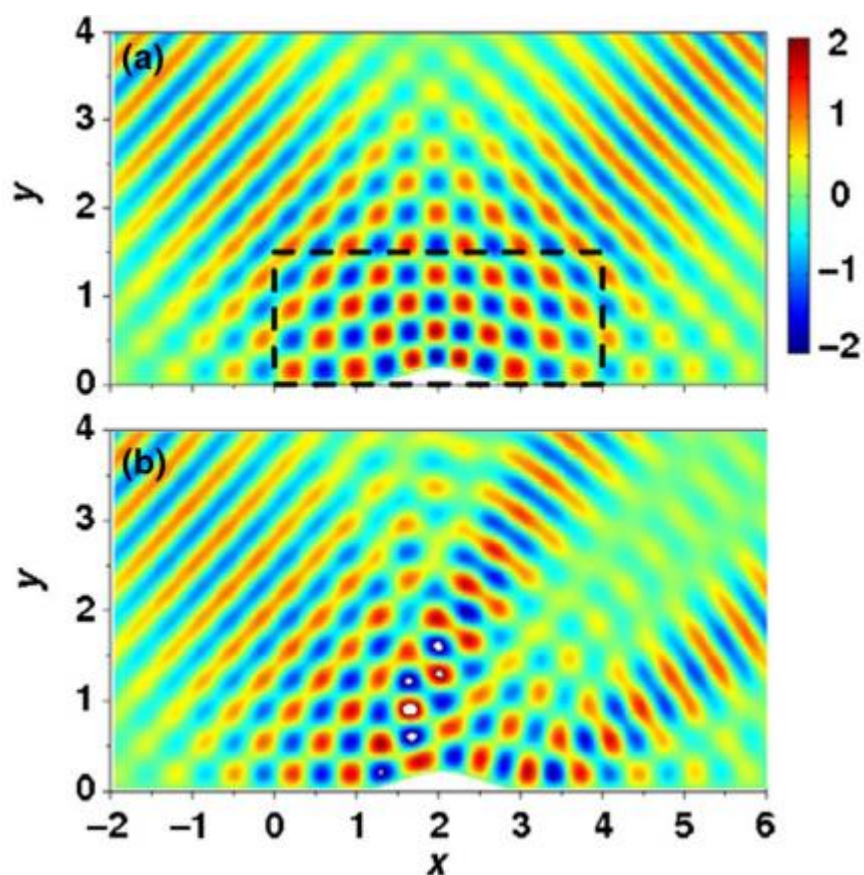


Рис. 1.7. Чисельне моделювання килимового маскування. (а) Відображення дзеркалом РЕС з горбом, покритий «килимом» (міститься в пунктирному прямокутнику) і (б) варіант з непокритим предметом. [5]

Цей спосіб також має певну кількість недоліків. По-перше, це за своєю суттю двовимірний поверхня, що робить прихований об'єкт автоматично виявленим за допомогою експерименту розсіювання в третьому вимірі, як це було вивчено в роботі. [6]. По-друге, незважаючи на те, що анізотропія в плащі слабка, її не можна апроксимувати до нуля. Ізотропні покриття килимів дійсно страждають від ефекту бічного зсуву [7], що робить їх еквівалентними використанню другої площини заземлення на вершині горба, який очевидно виявляється, оскільки відбувається зсув відбитого променя для кінцевої ширини, як би дзеркало було ближче, ніж повинно бути. Це призводить до поразки початкової мети спроби позбутися анізотропії: просто неможливо мати ізотропний килимовий плащ, а слабка залишилася анізотропія необхідна для невидимості. Це зауваження провели дослідники, ставлячи наступне запитання: замість того, щоб ставити нульову анізотропію, чи можна було б

націлити на конкретний анізотропний матеріал, який у нас вже є в природі, і побудувати всі діелектричні, широкосмугові килимові плащі на основі природних двопробових матеріалів. як кальцит? Адже ми маємо ступінь свободи вибору трансформації вибору. Виходячи з цієї ідеї, було виявлено, що афінні перетворення можуть призвести до того, що килимові плащі зроблені з природних анізотропних матеріалів [8-12], кальциту у видимій [7,9] і сапфіру в ТГц [11]. Цей метод дозволяє створити відносно широкосмугове маскування килимів макроскопічних об'єктів зі слабкою кутовою чутливістю і відсутністю бічного зсуву для даної поляризації світла. Поклавши один до одної дві килимові поверхні, можна також позбутися площини землі і приховати об'єкти у вільному просторі одно направлено або в декількох напрямках. Ці варіанти килимового маскування добре працюють для великих вільно стоячих об'єктів, але тільки для конкретних напрямків і часто жертвують збереженням фаз.

Цікавим напрямком в області маскування килимів є градуировані неоднорідні метаповерхні, які можуть замінити об'ємні трансформаційні плащі, щоб приховати шишку на земній площині. Нещодавно, використовуючи принцип еквівалентності, були розроблені ультра тонкі прикриваючі метаповерхні для заміщення плащів наземних площин [13, 14].

#### 1.4.4 Мантийне маскування (mantle cloaking)

Мантийне маскування сильно зменшує розсіювання об'єкта шляхом скасування домінуючих термінів у мультипольному розширенні розсіяного поля. Цей підхід використовує ультратонку частотно-селективну поверхню (ЧСП), яка сконструйована таким чином, що індуковані струми вздовж поверхні скасовують розсіювання від об'єкта до мантиї [15]. Така стратегія особливо актуальна на мікрохвильових частотах, на яких частотно-селективні поверхні є легко доступними і легко виготовляються [16, 17]. Перевагами є низька вага і тонкість плащ, які можуть бути конформними до об'єкта.

Приклади конструкцій плащів мантиї, які можуть бути використані для керування розсіюванням сфери, показані на рис. 8.

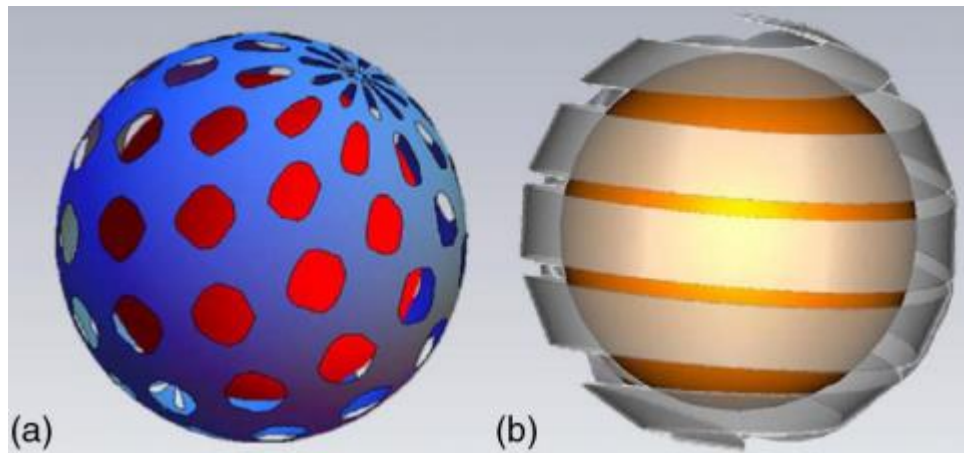


Рис. 1.8. Можливі приклади мантийних поверхонь для маскування діелектричної сфери [15].

Ефект поверхні полягає в введенні розриву тангенціального магнітного поля по всій його межі. Цей розрив контролюється величиною поверхневого імпедансу  $Z_s$  частотно-селективної поверхні, що дає граничний стан

$$E_{\tan} \big|_{r=a^{\pm}} = Z_s^{TM} r \times \left( H_{\tan} \big|_{r=a^{+}} - H_{\tan} \big|_{r=a^{-}} \right) \quad (3)$$

Типові конструкції використовують періодичні металеві структури, нанесені на тонкий діелектричний шар, наприклад масиви смуги, плями, отвори або хрести [19]. На частотах ТГц було запропоновано використовувати графен для реалізації мантийного плаща товщиною в один атом [20]. На прикладі малого діелектричного поля діелектричної проникності  $\epsilon$  і радіуса  $a$  необхідний поверхневий імпеданс для скасування розсіювання можна розрахувати за теорією Мі, враховуючи граничну умову (3), і знайдемо [15]

$$Z_s = j \frac{2[2 + \epsilon - \gamma^3(\epsilon - 1)]}{3\gamma^3 \omega a \epsilon_0 (\epsilon - 1)} \quad (4)$$

де  $\gamma = a/a_c$  - відношення між сферою і радіусами плаща.

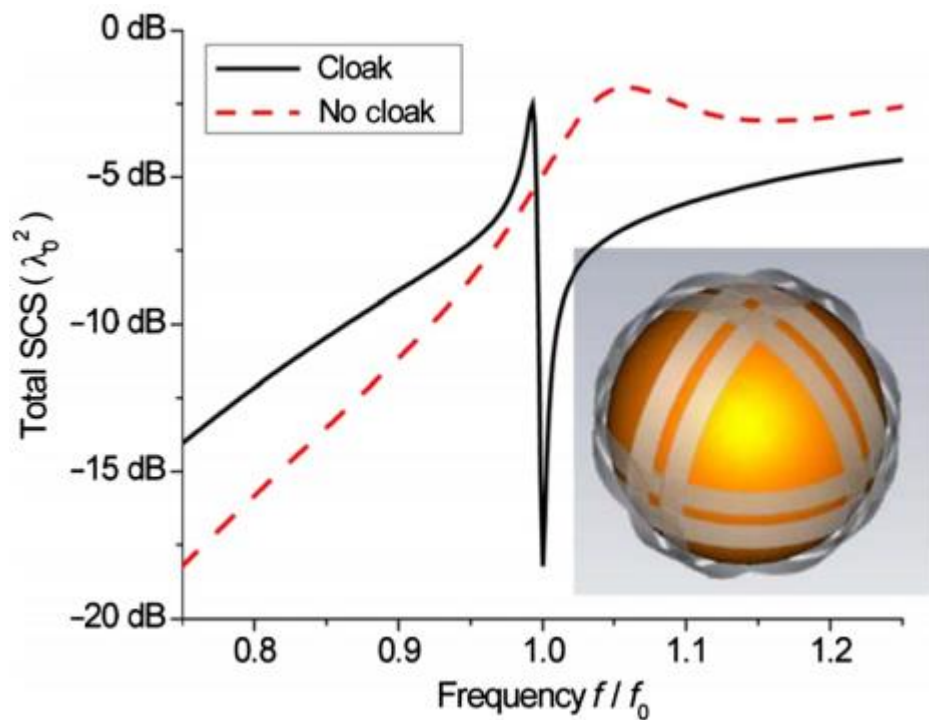


Рис. 1.9. Суттєве зменшення перерізу розсіювання діелектричного об'єкту може бути отримано за допомогою частотно-селективних поверхонь [15].

На рис. 9 показаний приклад діелектричної сфери з  $\epsilon = 10$ , покритої квазі-ізотропною ЧСП, виконаною з шести ортогональних взаємопов'язаних провідних смуг, з  $\gamma = 0.91$ . Діаграма показує поперечний переріз розсіювання сфери в маскованих і незакритих випадках по відношенню до частоти в одиницях розрахункової частоти  $f_0$ , що визначається як частота, на якій ЧСП задовольняє умові (4). Ця реалістична конструкція може забезпечити зменшення розсіювання до 15 дБ на цій частоті для діаметра об'єкта  $\lambda = 3$ . Експериментально підтверджено мантийне маскування, отримане маскування діелектричного стрижня у вільному просторі та з усіх кутів [18]. На рис. 10 показані вимірювання ближнього поля і порівняння випадків замаскованого циліндра з нерозкритим корпусом і випадком вільного простору для випадку діелектрика. Для поліпшення придушення розсіювання, розширення смуги пропускання і перекриття більших об'єктів можуть бути складені кілька поверхонь. Крім того, мантийне маскування особливо добре підходить для придушення розсіювання від передавальних і приймальних антен, враховуючи його відповідність і легкість реалізації.



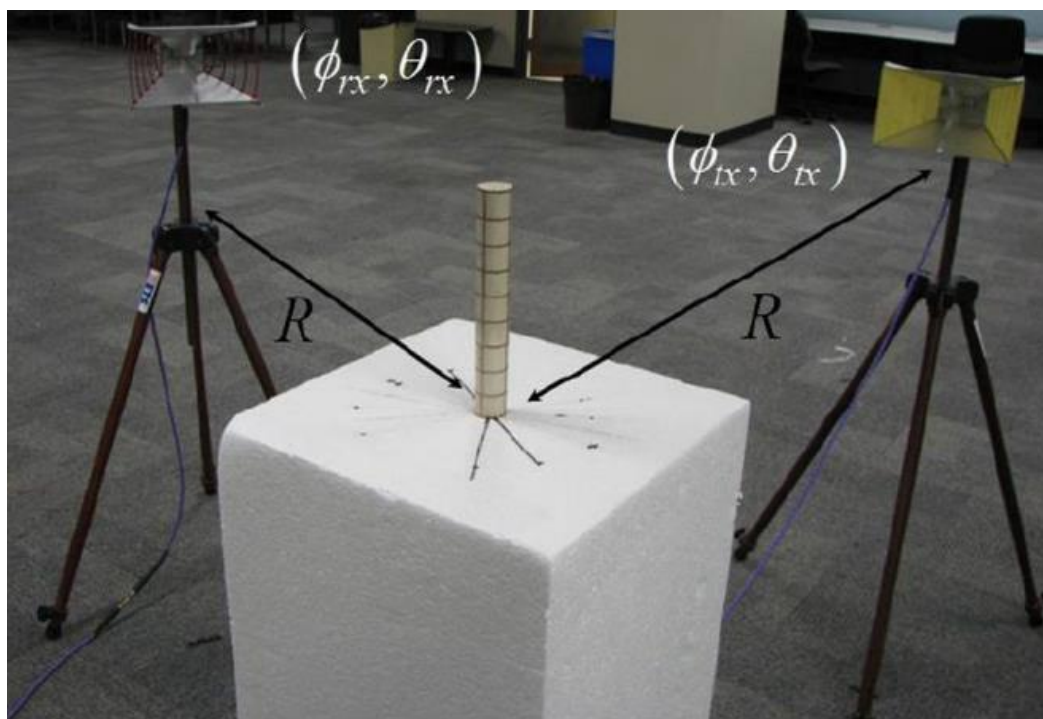


Рис. 1.10. Експеримент з мантийною технологією маскування, який показує приховування розсіювання на всіх кутах для циліндричного об'єкта при мікрохвильових частотах. [18]

### 1.4.5 Порівняння технологій

На додаток до представлених вище методів, в літературі доступні альтернативні методи приховування. Маскування з використанням мереж передачі використовує відповідну сітку електромагнітних компонентів для керування електромагнітною енергією всередині мережі, яка сама по собі не розсіюється і пропонує приховати маленькі об'єкти в порожніх просторах сітки [21–22]. Маскування паралельної пластини фокусується на заданій поляризації падаючого поля і індукує маскування шляхом маршрутизації електромагнітної потужності навколо об'єкта за допомогою паралельних провідних пластин з адіабатично зменшувальною сепарацією [23–24]. Методи аномального резонансу використовують резонанс, що відбувається на межі взаємодоповнюючих середовищ, для індукування невидимості в кінцевій області поза мантиї [25–26]. Всі ці методи засновані або на принципах, схожих на трансформацію електродинаміки, тобто на маршрутизацію впливу потужності навколо об'єкта, або на принцип домінуючого скасування

розсіювання, в якому ми дозволяємо об'єкту поляризувати, але поляризація плащ компенсує одну. об'єкта. Оскільки вони ґрунтуються на аналогічно обмежених явищах, вони мають подібні переваги і недоліки в порівнянні з трансформаційною оптикою і плазмонним маскуванням [27].

Всі стратегії маскування, обговорювані в цьому розділі, є актуальними в різних практичних ситуаціях. Всі вони мають деякі недоліки, які принципово залежать від основної фізики методу маскування, а також технічних проблем, які необхідно вирішити, перш ніж вони можуть бути використані в повному обсязі. Підсумовуємо в Таблиці I переваги, недоліки та / або технічні проблеми, пов'язані з основними методами маскування, обговорюваними в цій частині.

Таблиця 1.1. Порівняння методів реалізації СТЕЛС технології.

Метод	Переваги	Недоліки
Маскування зі сферичною трансформацією	Ідеальне для маскування з усіх боків	Нульова ширина смуги частот Висока складність конструкції
Килимове маскування	Працює лише для діелектриків Найвища ширина смуги частот	Лише для 2Д маскування Потребує дзеркала, працює не на всіх кутах
Мантійне маскування	Працює з ізотропними гомогенними матеріалами Конформальне Має прийнятну ширину смуги частот	Обмежене розмірами

Розглядаючи таблицю I, ми бачимо, що використання сферичного перетворення є елегантним рішенням проблеми маскування, оскільки дає можливість ідеально скасувати кут розсіювання, незалежно від об'єкта та його розміру. Зазначимо, однак, що смуга пропускання фундаментально обмежена однією частотою, і що плащ може бути побудований лише приблизно (наприклад, завдяки мікроскопічній структурі метаматеріалів фазова



швидкість на внутрішній границі ніколи не буде точно нескінченною). Це великий виклик, оскільки такий метод маскування чутливий до недосконалостей геометрії. Більш того, необхідна анізотропія і збалансований електричний і магнітний відгук мантиї є складним, і до теперішнього часу ніхто навіть не намагався побудувати такий плащ без істотного спрощення конструкції, ввівши значне небажане розсіювання. На оптичних частотах такий плащ може навіть не бути реалістичним, оскільки сильні магнітні реакції можуть бути неможливими. Килимові плащі та їхні варіанти мають перевагу в діелектричній конструкції, що забезпечує контроль над анізотропією плащів і великою пропускнуою здатністю. Початкові конструкції килимових поверхонь розраховані на мінімізацію анізотропії, а наступні конструкції (включаючи варіант односпрямованих плащів кальциту) пристосовані для реалізації природними анізотропними матеріалами. Основними недоліками є той факт, що невидимість є тільки 2D, і об'єкт видно в третьому вимірі, і ці методи вимагають або наявності площини заземлення, або роботи тільки для певних напрямків освітлення.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		28

## 1.5 Способи підстроювання частотно-селективної поверхні

### 1.5.1 Вступ

У більшості застосувань ЧСП параметри геометрії та матеріалу були розроблені для отримання статичної частотної характеристики. Тим не менш, кілька груп дослідили можливість налаштування або реконфігурації, так що його частотна характеристика може бути зміщена або змінена під час роботи. Це може бути досягнуто або шляхом зміни електромагнітних властивостей субстрату ЧСП, або шляхом зміни геометрії структури, або шляхом введення елементів схеми в екран ЧСП, які змінюють поточний струм між металевими латками. У першому класі реконфігурованої ЧСП (РЧСП) частотна характеристика ЧСП змінюється зміною електромагнітних властивостей підкладки, яка може бути виконана багатьма засобами, такими як використання фериту в якості матеріалу підкладки і застосування зміщення постійного струму через нього, або використовуючи рідкий діелектрик як підкладку і змінюючи його обсяг. Другий клас РЧСП базується на зміні геометрії ЧСП механічно за допомогою двигунів, мікро електромеханічних систем (MEMS) і т.д. Металеві елементи ЧСП спроектовані таким чином, щоб вони могли змінювати орієнтацію або положення, що дозволить зміна частотної характеристики ЧСП [28]. Третій клас РЧСП, який слід розглядати, включає компоненти схеми в металевий екран, який може використовуватися для зміни струму між металевими елементами, які по черзі змінюють частотну характеристику ЧСП. Це може бути досягнуто за допомогою варакторів або PIN - діодів. Також можливе підстроювання ЧСП за допомогою зміни густини заряду у плазмі [30].

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		29

### 1.5.2 Підстроювання на основі MEMS структури

ЧСП з підстроюванням реалізується за допомогою інтеграції твердих магнітних матеріалів з мікро електромеханічними системами (MEMS), забезпечує нову варіацію реконфігурованих частотно-селективних поверхонь (ЧСП). За допомогою магнітно-активованих дипольних елементів, які здатні відхилятися від опорної поверхні, можливо налаштувати робочу частоту ЧСП без фізичної зміни розмірів дипольних елементів [28].

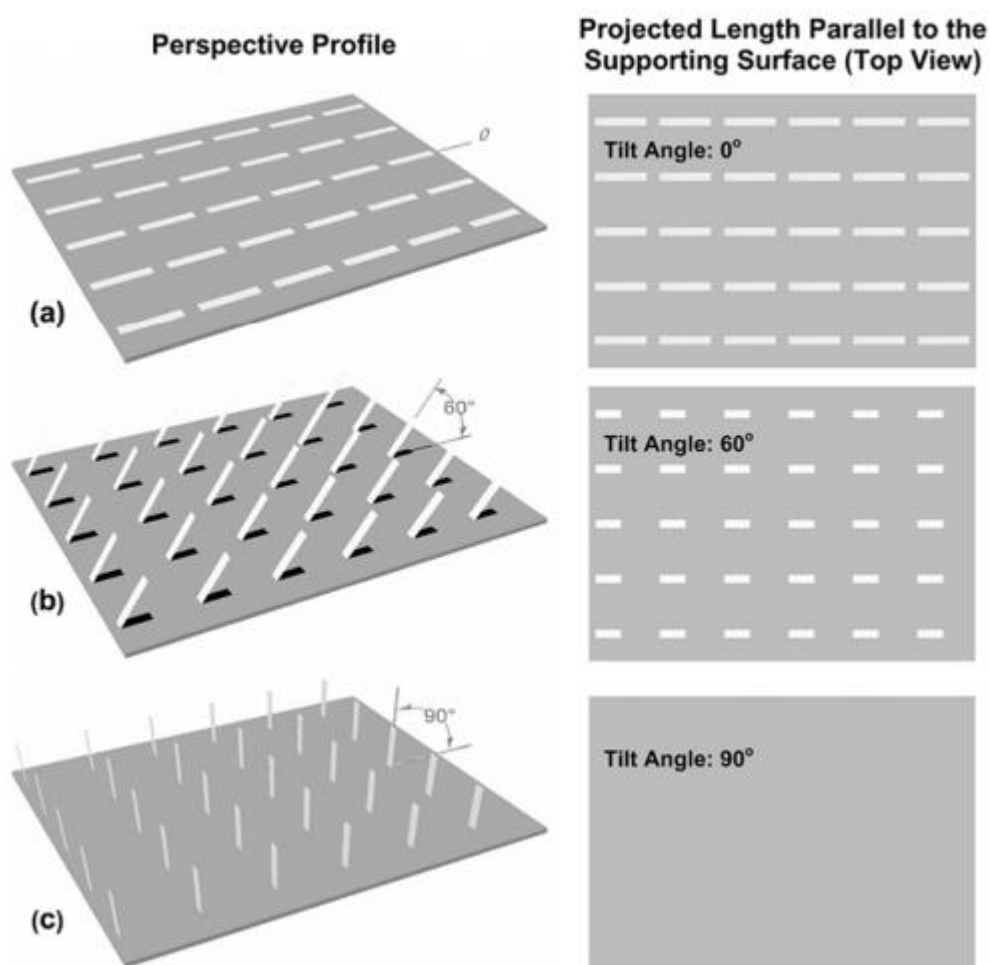


Рис. 1.11. Ілюстрації частотно-селективної поверхні, що демонструють обертові дипольні масиви з елементами, поверненими з площини (a) 0°, (b) 60° і (c) 90° [28].

Матриця з 25x25 мікроактуаторів, складається з феромагнітної пластини 896x168x30  $\mu\text{m}^3$ , виготовленої з 40Co-60Ni, з провідником товщиною 1  $\mu\text{m}$  (Au), прикріпленим до пари полікремнієвих стержнів 400x10x1  $\mu\text{m}^3$  балки,

підвішені безпосередньо над опорною підкладкою. Висока залишкова намагніченість феромагнітного матеріалу дозволяє відносно малим магнітним полям ( $\sim 2.1$  кА/м) викликати значні кутові відхилення ( $45^\circ$ ). Ця інноваційна конструкція ЧСП успішно продемонструвала налаштування резонансної частоти на смугу пропускання 2,7 ГГц на частоті 85 ГГц.

З MEMS частотну характеристику FSS можна регулювати шляхом механічного переконфігурування розміру, форми, інтервалу і / або орієнтації провідних елементів, які складають матрицю FSS, замість зміни властивостей матеріалу опорної поверхні.

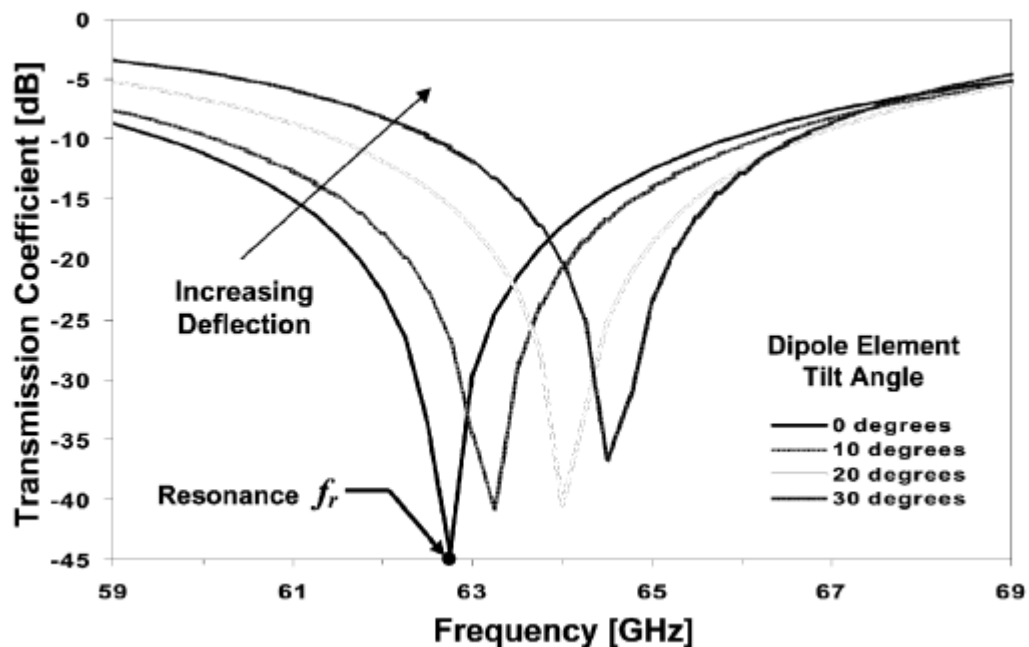


Рис. 1.12. Симуляція частотної характеристики для ефекту нахилу масиву дипольних елементів від опорної поверхні. Зверніть увагу на помітний зсув вгору і вправо зі збільшенням кутового відхилення. [28]

Існує багато важливих факторів, які необхідно враховувати при плануванні процесу виготовлення мікромашини з магнітно-реконфігурованою FSS: втрати підкладки, магнітний матеріал і інтеграція процесу. Для досягнення найвищої відповіді потрібна підкладка з низьким рівнем втрат, яка мінімізує втрати вставки. У цій роботі використовуються високоомні (2-10) кремнієві підкладки типу p-типу. Для досягнення великих кутів відхилення

мікроактуаторів з використанням низькоприкладених магнітних полів необхідний твердий магнітний матеріал зі значною залишковою намагніченістю.

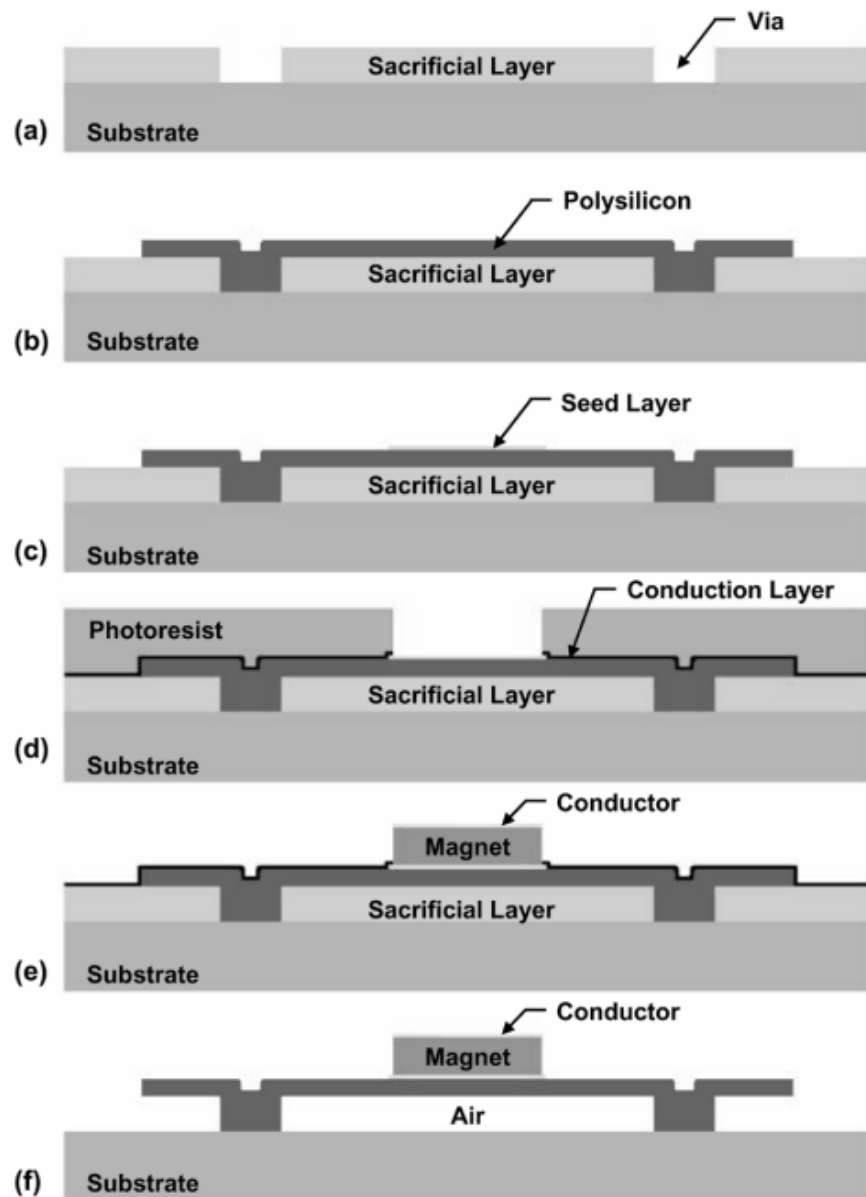


Рис. 1.13. Процес виготовлення елементів ЧСП: (а) осадження і травлення жертвних і мікрофлексуючих шарів; (б) осадження адгезії, насіннєвого і провідного шарів з утворенням лігатурної форми; (с) покритий сплавом Co-Ni і знята форма покриття; (d) видалення насіннєвого шару і жертвного шару для вивільнення пристрою. [28]

Високопровідний шар має важливе значення для полегшення резонансу пристроїв при збудженні електромагнітними хвилями. Процес виготовлення магнітного МЕМС-реконфігурованого ЧСП починається з осадження товстого

шару низькотемпературного оксиду (ДСН) на високоомний кремнієвий субстрат. Потім виконують крок фотолітографії, залишаючи за собою маску фоторезисту, яка виявляє місця розташування анкерних прокладок для торсіонних балок. Потім використовують плазмовий травлення для видалення оксиду, що призводить до утворення нанесеного на ній LTO жертвовного шару [див. Рис. 7 (а)]. 1-товсту плівку нелегованого полікремнію потім осаджують за допомогою хімічного осадження з низьким тиском (LPCVD). Потім використовують другий етап фотолітографії для визначення механічних структур. Плазмовий травлення видаляє відкритий полікремній і утворює торсіонні пучки та мікроактуаторну пластину, де магнітний матеріал в кінцевому підсумку буде нанесений [див. Рис. 7 (b)]. Потім використовується третій етап фотолітографії, призначений для металевго підйомного шару, для визначення місць розташування магнітних елементів. Далі випарюють шар адгезії з плівки хрому (Cr) товщиною 10 нм, а потім шар насіння з плівки нікелю (Ni) товщиною 100 нм [див. Рис. 7 (c)]. Ацетон і ультразвукову ванну потім використовують для перемішування і підйому надлишкового металу, залишаючи за собою металеві островці, розташовані поверх пластин з полікремнію. Плівка титану товщиною 200 нм (Ti) потім розпилюється по всій поверхні, щоб служити в якості шару провідності між усіма елементами Ni під час процесу нанесення. Четвертий і останній етап фотолітографії використовується для створення 48-точкової плівки фоторезисту (Shipley, SJR 5740). Цю форму формують на вершині провідного шару Ti і розташовують над ділянками насінневого шару Ni, де потрібно наносити гальванічний магнітний матеріал. Короткий занурення в плавикову кислоту 100: 1 видаляє Ti з місць, де має відбуватися електро-осадження магнітного матеріалу. Особлива увага приділяється тому, щоб запобігти перекрашенню шару провідності [див. Рис. 7 (d)]. Потім пластину поміщають у гальванічну ванну і достатню кількість електричного заряду доставляють до місць нанесення покриття для електро-осадження 30-толикового шару CoNi (див. Таблицю I

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		33

для рецепту CoNi-гальванічної ванни), а потім 1- - товстий шар електро-осадженого Au. Після видалення товстої плівки фоторезисту, підданий Ti провідний шар повністю видаляється в буферному оксидному траві 6: 1 (BOE), і жертвний шар LTO також повністю травиться, тим самим звільняючи мікроактуатори. Для послідовного промивання з використанням сумішей деіонізованої води з метанолом 1: 0, 1: 1 і 0: 1 використовують для промивання розчину BOE шляхом розведення. Нарешті, виконується надкритична сушка для запобігання прилипання механічних структур до підкладки (рис. 7 (f)).

### 1.5.5 Підстроювання з використанням плазми

Більшість сучасних стаціонарних регульованих поглиначів використовують елементи налаштування, такі як PIN-діоди, напівпровідникові та сегнетоелектричні варактори, MEMS-перемикачі та рідкокристалічні полімери. Однак ці технології мають власні обмеження, які вимагають компромісу між діапазоном налаштування, надійністю, лінійністю, вартістю та вагою. З точки зору надійності, згадані регульовані поглиначі є вразливими при експлуатації в екстремальних умовах навколишнього середовища, включаючи високі температури і ЕМ випромінювання радіолокаційних систем спостереження високої потужності НВЧ-енергії (НРМЕ). Це пояснюється тим, що такі компоненти налаштування мають обмежену потужність. Більш того, вибір матеріалу з втратами є важливим, коли термічні напружки, зумовлені середньомасштабними омічними втратами, мають першочергове значення, оскільки, якщо температура перевищує рівень згоряння матеріалу з втратами, відбувається горіння.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		34

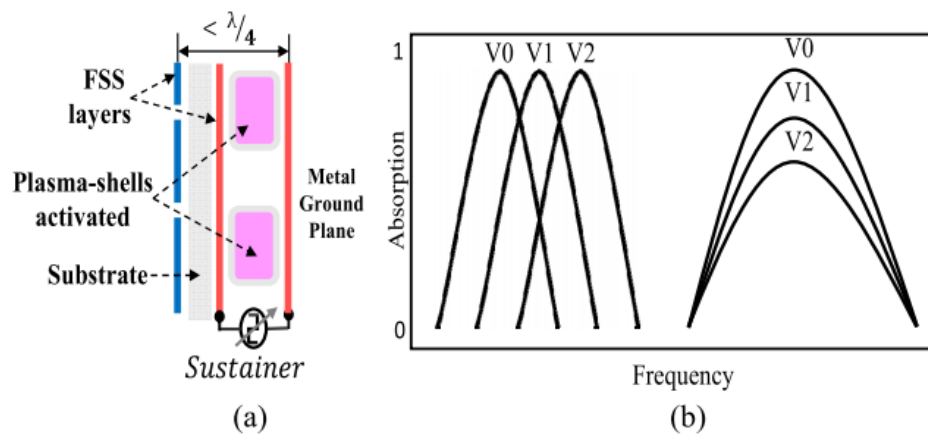


Рис. 1.14. (а) Топологія запропонованої плазмової оболонки з можливістю керування поглинанням. (б) Очікувана частотна характеристика, що показує настроюваний / адаптивний відгук для різних напруг зсуву плазмових оболонок. [29]

В даній [29] роботі було досліджено можливість розробки великомасштабного адаптивного поглинача, який може підтримувати стабільну роботу в спостереженні на полі бою за умови короткоімпульсної енергії НВЧ (НРМ). Ця концепція заснована на топології конструкції, показаної на рис. 1. Запропонований поглинач включає дискретні плазмові оболонки в якості компонентів налаштування. Примітно, що він має унікальну властивість витримувати енергію НРМ. Проте реалізація практичного великомасштабного плазмового пристрою поставила проблеми в інтеграції плазми з ЕМ-пристроєм і забезпечила контроль за його властивостями (щільність плазми, газовий склад і тиск). Часто плазмові пристрої, які раніше використовувалися, були громіздкими, тендітними, а не герметичними. В основному, немає контролю за вмістом газу і тиском. Отже, вони мають короткий термін експлуатації і не витримують суворих аерокосмічних, військових або супутникових застосувань. Нещодавно були запатентовані невеликі керамічні камери для герметизації газу, щоб генерувати плазму при належному зміщенні. Ці плазмові оболонки використовувалися як швидкі електронні перемикачі реального часу (короткі 10 нс) при розробці практичної великомасштабної перемикається ЕМ-поля, що блокує частотну-селективну поверхню (ЧСП) для захисту ЕМ системи, що піддаються імпульсу НРМ / ЕМ



(ЕМР). Корпуси надзвичайно міцні і стійкі до ударів, вібрації та екстремальних температур. Сліди ЧСП можна використовувати як практичну схему плазмового зміщення для розподілу енергії по зовнішній поверхні оболонок. Коли оболонки електрифікуються, інкапсульований газ іонізується, щоб випромінювати, відбивати або поглинати енергію ЕМ. Типові розміри плазмових оболонок становлять від 0,5 до 10 мм і сумісні з технологіями збірки сучасної техніки. Корпуси надзвичайно легкі і можуть бути виготовлені в різних формах: сферах, циліндрах, кубах, сплюснених сфероїдах, прямокутних призмах та інших складних формах. До первинних матеріалів оболонок належать:  $Y_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , вуглецева сталь і різні склянки. Благородні гази (гелій, неон, аргон, криптон і ксенон) часто використовуються як суміш всередині герметичної оболонки. Можливість налаштування оболонок (матеріал, розмір, форма, текстура і щільність) дозволяє їм легко інтегруватися в багато прикладні програми.

Доцільність реалізації поглинача з можливістю контролювати пропускну здатність або робочу частоту є основним акцентом у цьому розділі. Дизайн базової лінії, показаний на рис. 1, спочатку був досліджений кількома способами. По-перше, правильний вибір обох шарів ЧСП є ключовим фактором ефективності поглинання. Для того, щоб керувати робочою смугою з подвійними резонансами, зупинка щільно каскадується з смуговим шаром [33] поверх площини заземлення. Блочний резонатор (верхній шар) буде служити в якості компонента втрат, в той час як смуговий резонатор (середній шар) може бути використаний як зміщення слідів для розподілу енергії на масив плазми-оболонки. Елементна комірка запропонованого пасивного поглинача показана на рис. 2.

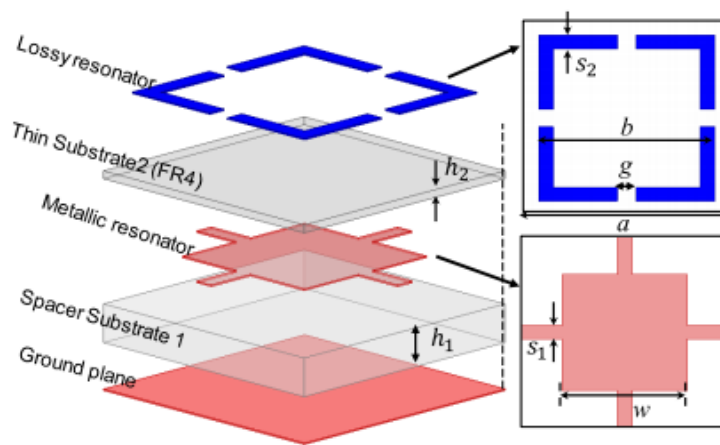


Рис. 1.15. Топологія запропонованого пасивного абсорбера, що складається з розділеного квадратного петлевого резонатора, тісно каскадується з модифікованою структурою EBG поверх площини заземлення разом з детальною геометрією елементарної комірки кожного шару. [29]

Шар втрат - це масив розділеної квадратної петлевої одиниці, розташованої в 2-D решітці, що імітує смуговий резонатор. Він виготовлений з резистивної плівки з поверхневим опором  $RS$ . Металевий шар, змінена структура смуги пропускання (EBG), являє собою комбінацію квадратного матриці патч і дрової сітки і обліку смугового резонатора. Обидва шари друкуються на тонкій підкладці FR4 з товщиною  $h_2$  і відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_{r2} = 4.4$ . Між площиною заземлення і металевим шаром розміщується прокладка з товщиною  $h_1$  і відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_{r1} = 1$ .

У цій [29] роботі було продемонстровано, що за допомогою інтеграції плазмових оболонок з схемами поглинання аналогового сигналу (Circuit analog absorber or CAAs) контроль смуги частот поглинання центральної смуги та смуги пропускання дозволяється шляхом зміни частоти плазми. У реалістичних космічних датчиках напруга зсуву, що використовується для підтримки плазми, може бути просто відрегульована для управління передавальної функцією поглинача. В цілому, ця нова технологія покращує сучасний стан за межами інших адаптивних поглиначів, обробляючи відносно НРМЕ та високу НЕМР у жорстких та динамічних середовищах ЕМ для задоволення вимог сфер з використанням СТЕЛС.

## Висновки

У даному розділі дипломної роботи було описано історію розвитку метаматеріалів, або матеріалів з від’ємним показником заломлення. Також було розглянуто методи маскування за допомогою частото-селективних метаповерхонь, а саме – сферичне маскування на основі електродинаміки трансформації, неевклідове трансформаційне маскування, килимове маскування, мантийне маскування. Було підведено підсумок і порівняно усі ці методи.

Було розглянуто способи підстроювання частотно-селективних поверхонь і також порівняно методи. Підстроювання на основі MEMS структури плавне, але ненабагато збільшує ширину смуги пропускання, коли як підстроювання на основі плазми більш різко змінює характеристики частотно-селективної поверхні, але складніше у конструюванні.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		38

## 2 РОЗРАХУНОК ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНОЇ ПОВЕРХНІ

### 2.1 Вступ

Зазначено, що частотно-селективна поверхня вигляду квадратна петля (square-loop frequency-selective surface, або SLFSS) забезпечує гарну продуктивність з точки зору кутової стабільності, поперечної поляризації, смуги пропускання та розділення смуг [30]. Завдяки цим унікальним властивостям, вчені досліджували одинарну частотно-селективну поверхню (single SLFSS) та подвійну частотну частотно-селективну поверхню (dual SLFSS) [32]. Крім того, для аналізу ЧСП були розроблені різні чисельні методики, де кожен з них пов'язаний з власними достоїнствами та недоліками [31,33]. Серед цих аналітичних методів модель еквівалентної схеми користується великою популярністю завдяки своїй простоті, де еквівалентні зосереджені параметри ЧСП виходять за рахунок індуктивної та ємнісної поведінки петлі і зазору між двома петлями. Аналіз ЧСП залежить від фізичних параметрів, таких як період ( $p$ ) петлі, розмір петлі ( $d$ ), ширина петлі ( $w$ ) і зазор між двома петлями ( $g$ ), що зображені на рис. 2.1. У методиці, запропонованій у [31], після фіксації фізичних параметрів, обчислюється величина асоційованої індуктивності та ємності, щоб знайти умови резонансу, передачі та відображення петлі. Ця модель допомагає знайти резонансну частоту структури, передачі та поведінки відбиття петлі, коли дані тільки фізичні параметри. Іншими словами, цей метод дозволяє синтезувати ЧСП, що дуже важливо для знаходження значення фізичних параметрів структури для задоволення конкретної частоти резонансу і вимоги до смуги пропускання.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		39

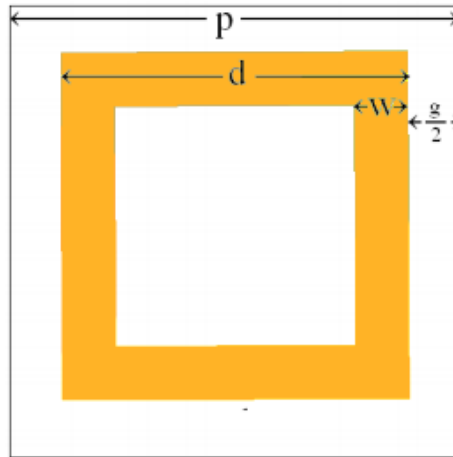


Рис. 2.1. Схема однієї комірки масиву ЧСП

## 2.2 Теорія розрахунку ЧСП

Модель еквівалентної схеми SSLFSS, яка розроблена [34], була використана для вилучення ланцюгової індуктивності ( $L$ ) і ємності ( $C$ ). За допомогою моделі еквівалентної схеми еквівалентну індуктивність і ємність отримують з заданих фізичних параметрів ЧСП, як періодичність ( $p$ ), довжина петлі ( $d$ ), ширина смуги ( $w$ ), кут падіння ( $\theta$ ) і міжконтурний зазор ( $g$ ), де ці параметри показані на рис. 2.1. Однак, при розробці SSLFSS бажано знайти розмір петлі і періодичність структури петлі для резонансу на конкретній частоті і мати бажану смугу пропускання. Існуючий метод лише дає знання про значення  $L$  і  $C$  для даного квадратного циклу, але точний синтез квадратного циклу від знання частоти резонансу є складним завданням і не розглядається належним чином. Щоб подолати труднощі синтезу SSLFSS, була використана проста і нова формула для розрахунку розміру петлі з певною точністю, розроблена [30-31,34]. Для поперечної електричної (TE) поляризованої хвилі елементи еквівалентної схеми отримують наступними рівняннями.

$$\frac{\omega_r L}{Z_0} = \frac{d}{p} \cos \theta \times F(p, w, \lambda, \theta) \quad (5)$$

$$F(p, w, \lambda, \theta) = \frac{p}{\lambda} \left[ \ln \csc \left( \frac{\pi \omega}{2p} \right) + G(p, w, \lambda, \theta) \right] \quad (6)$$

Також

$$\frac{\omega_r C}{Y_0} = 4 \frac{d}{\lambda} \sec \theta \times F(p, g, \lambda, \theta) \times \varepsilon_{eff} \quad (7)$$

$$F(p, w, \lambda, \theta) = \frac{p}{\lambda} \left[ \ln \csc \left( \frac{\pi g}{2p} \right) + G(p, g, \lambda, \theta) \right] \quad (8)$$

У рівняннях (5) - (8),  $\varepsilon_{eff}$ ,  $Z_0$ ,  $Y_0$ ,  $G(p, w, \lambda, \theta)$ ,  $G(p, g, \lambda, \theta)$  - ефективна діелектрична проникність середовища, характеристичний імпеданс, характеристика допуску, коригуючі коефіцієнти для відповідної індуктивності і ємності відповідно. Коли корегуючі коефіцієнти ігноруються за рахунок незначного відхилення результату, рівняння (5) і (7) можуть бути переписані як:

$$\frac{\omega_r L}{Z_0} = \frac{d}{p} \cos \theta \times \frac{p}{\lambda} \ln \left[ \csc \left( \frac{\pi \omega}{2p} \right) \right] \quad (9)$$

$$\frac{\omega_r C}{Y_0} = 4 \frac{d}{p} \sec \theta \times \frac{p}{\lambda} \ln \left[ \csc \left( \frac{\pi g}{2p} \right) \right] \times \varepsilon_{eff} \quad (10)$$

У випадку повітря як субстрату, множення рівнянь (9) і (10) дає:

$$\omega_r^2 LC = 4 \left( \frac{d}{p} \right)^2 \left( \frac{p}{\lambda} \right)^2 \times \ln \left[ \csc \left( \frac{\pi \omega}{2p} \right) + \csc \left( \frac{\pi g}{2p} \right) \right] \quad (11)$$

У Рівнянні (11) ліва сторона рівняння вказує на стан резонансу / антирезонансу. Для відбиваючої ЧСП, при резонансі, її значення має бути 1,0, оскільки  $\omega_r^2 = 1 / LC$ . Отже, Рівняння (11) може бути переписано у наступному вигляді.

$$1 = 4 \left( \frac{d}{p} \right)^2 \left( \frac{p}{\lambda} \right)^2 \times \ln \left[ \csc \left( \frac{\pi \omega}{2p} \right) + \csc \left( \frac{\pi g}{2p} \right) \right] \quad (12)$$

Далі, рівняння (12) спрощується так:

$$1 = 4 \left(\frac{d}{p}\right)^2 \left(\frac{p}{\lambda}\right)^2 \times \ln \left[ \frac{1}{\sin \left[ \frac{\pi \omega}{2p} \right]} + \frac{1}{\sin \left( \frac{\pi g}{2p} \right)} \right] \quad (13)$$

Для випадку  $w \ll 2p$  і  $g \ll 2p$ , рівняння (13) записується як:

$$1 = 4 \left(\frac{d}{p}\right)^2 \left(\frac{p}{\lambda}\right)^2 \times \ln \left[ \frac{2p}{\pi \omega} + \frac{2p}{\pi g} \right] \quad (14)$$

У випадку вільно упакованої ЧСП величина  $g$  набагато перевищує  $w$ , а відношення  $2p / \pi w$  домінує над співвідношенням  $2p / \pi g$  і з незначною жертвою в точності.

$$1 = 4 \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2 \times \ln \left( \frac{2p}{\pi \omega} \right) \quad (15)$$

Відомо, що для заданої структури ЧСП відповідь змінюється зі зміною кута падіння хвилі і періоду  $p$  ЧСП і щоб уникнути решітки часток, вона пов'язана з довжиною хвилі ( $\lambda$ ) за рахунок наступні відносини.

$$\rho(1 + \sin \theta) < \lambda \quad (16)$$

З рівняння (16) спостерігається, що для заданого максимального кута падіння може бути встановлено математичне співвідношення між  $p$  і  $\lambda$ , якщо нерівність виконується. Структура повинна працювати задовільно над кутом  $\theta_1$ . Тоді можна вибрати значення  $\theta = \theta_2$  в рівнянні (16), де  $\theta_2 > \theta_1$ . На цьому шляху було виявлено, що нерівність рівняння (16) виконується і значення  $p$  фіксується як:

$$p = M\lambda \quad (17)$$

У рівнянні (17)  $M$  - константа і варіюється від 0 до 1. Заміна рівняння (17) в (15) дає наступне вираз.

$$1 = 4 \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2 \times \ln \left( \frac{2M\lambda}{\pi \omega} \right) \quad (18)$$

З рівнянь (16) і (18) виявлено, що з пізнанням робочої частоти, необхідної ширини смуги як частки довжини хвилі і максимального очікуваного кута падаючої хвилі довжина петлі може бути обчислена. і далі оптимізовані. Загалом, процедура однаково підходить для поляризованої хвилі ТМ. Оскільки квадратна петля ЧСП є незалежною від поляризації, формула, для режиму ТЕ, також застосовується до режиму роботи ТМ. Крім того, ця формула також забезпечує спосіб контролю величини відображення на будь-якій конкретній частоті. У Рівнянні (11) ліву частину рівняння встановлено як 1,0 для умови резонансу. В ідеалі, на цій частоті, значення  $|S_{11}|$  дорівнює 1,0. Якщо 1,0 у Рівнянні (11) замінюється деяким іншим значенням, меншим, ніж 1,0, то аналіз показує стан поза резонансу, і це може бути використано для регулювання величини відображення на цій конкретній частоті.

Таблиця 2.1. Параметри петлі при 3 ГГц та кута падіння  $10^\circ$

$w/\lambda$	$p$ (mm)	$d$ (mm)	$w$ (mm)	$f_r$ (GHz) (simulated)	% deviation of $f_r$ from 3 GHz
0.01	85.20	25.02	1	3.30	10
0.02	85.20	27.52	2	3.22	7.3
0.03	85.20	29.38	3	3.18	6
0.04	85.20	30.96	4	3.16	5.3
0.05	85.20	32.38	5	3.15	5.0
0.06	85.20	33.69	6	3.15	5.0

## 2.3 Моделювання і розрахунок ЧСП

Для підтвердження обчислених даних у розділі 2.2, були розраховані фізичні параметри SSLFSS на частотах 3 ГГц, 15 ГГц і 26 ГГц, а його правильність перевірена електромагнітним моделюванням в CST Microwave Studio, що базується на кінцевій інтегральній техніці. У першому випадку параметри циклу аналізуються для нормальної падаючої хвилі ( $\theta = 0^\circ$ ). Для обчислення величини  $p$ , уникаючи при цьому решітки на заданій частоті, величину  $p$  обчислюють, виконуючи умову, описану в Рівнянні (16), і цю умову, яка є метою аналізу, і  $\theta > 0^\circ$  необхідно враховувати. Для того, щоб задовольнити це обмеження синтезу, було обрано значення  $\theta = 10^\circ$  і на цьому



шляху значення  $M$  дорівнює 0,1736. Одного разу значення  $M$  фіксується, для різних значень  $w / \lambda$  значення  $d$  обчислюється з використанням рівняння (18), і вона представлена в таблицях 2.1, 2.2 і 2.3 для 3 ГГц, 15 ГГц, і 26 ГГц відповідно. Крім того, щоб підтримати аналіз, структуру була змодельована CST Microwave Studio, як показано на рис. 2.2. Значення резонансної частоти, отримане в результаті моделювання, показано в 5-му стовпці цих таблиць, а в останньому стовпчику показана відносна похибка.

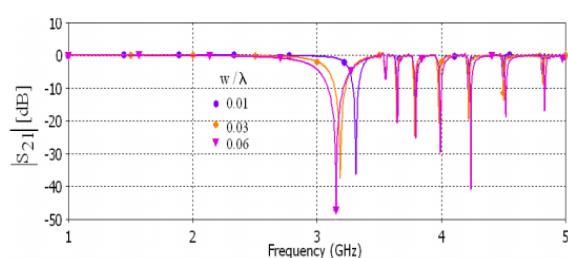
З рис. 2.2 (a), (b) і (c), виявлено, що при заданому куті падаючого положення (10 у цьому випадку), з збільшенням  $w / \lambda$  Коефіцієнт передачі нульової точки зміщується на нижню частоту і передача нульової смуги пропускання збільшується. Іншими словами, при збільшенні значення ширини смуги індуктивний ефект SSLFSS зменшується, і це призводить до збільшення ширини параметра розсіювання. У стані без втрат  $|S_{21}|^2 + |S_{11}|^2 = 1$ , і це вказує, що де  $S_{21}$  є мінімальним,  $S_{11}$  досягає максимуму і збільшується рівність відбиваючої властивості SSLFSS. Далі, з цього аналізу зрозуміло, що, змінюючи значення  $w / \lambda$ , бажана смуга відторгнення сигналу досяжна.

Таблиця 2.2. Параметри петлі при 15 ГГц та кута падіння  $10^\circ$

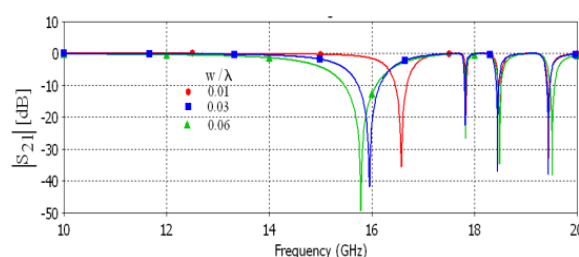
$w/\lambda$	$p$ (mm)	$d$ (mm)	$w$ (mm)	$f_r$ (GHz) (simulated)	% deviation of $f_r$ from 15 GHz
0.01	17.04	5.00	0.2	16.56	10.4
0.02	17.04	5.50	0.4	16.09	7.2
0.03	17.04	5.87	0.6	15.91	6
0.04	17.04	6.19	0.8	15.81	5.4
0.05	17.04	6.47	1.0	15.75	5.0
0.06	17.04	6.73	1.2	15.75	5.0

Таблиця 2.3. Параметри петлі при 26 ГГц та кута падіння  $10^\circ$ 

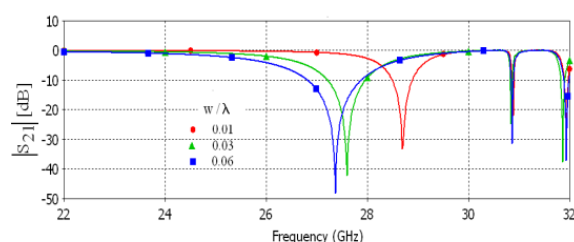
$w/\lambda$	$p$ (mm)	$d$ (mm)	$w$ (mm)	$f_r$ (GHz) (simulated)	% deviation of $f_r$ from 26 GHz
0.01	9.83	2.88	0.11	28.65	10.1
0.02	9.83	3.17	0.23	27.92	7.3
0.03	9.83	3.39	0.34	27.56	6
0.04	9.83	3.57	0.46	27.40	5.3
0.05	9.83	3.73	0.57	27.32	5
0.06	9.83	3.88	0.69	27.13	4.3



(a)



(b)



(c)

Рис. 2.2. Вплив  $w/\lambda$  на резонансну частоту на (a) 1–5 ГГц, (b) 12–18 ГГц, та (c) діапазон 22–32 ГГц.

## 2.4 Залежність від кута падіння

З Рис. 2.2 (a), (b) і (c) видно, що максимальна відносна похибка між передбачуваною і досягнутою робочою частотою становить приблизно 10%, що може бути додатково зменшено шляхом зменшення значення  $\theta$  в рівнянні (16). Коли це значення встановлюється рівним нулю, значення  $p$  дорівнює  $\lambda$ , а рівняння (16) не виконується, що вимагає додавання поправочного коефіцієнта до рівняння Маркувіца [34]. Проте, щоб сконструювати ЧСП, встановлюємо кут  $\theta$  близький до  $0^\circ$  для нормальної падаючої хвилі, і в цьому випадку помилка значно зменшується.

Таблиця 2.4. Вплив кута на ЧСП, розрахований при 3 ГГц з  $0.06 w/\lambda$ .

Angle ( $\theta$ ) (degree)	$p$ (mm)	$d$ (mm)	$w$ (mm)	Simulated ' $f_r$ ' (GHz)
0	100	32.5346	6	2.87
5	91.9831	33.1259	6	3.03
10	85.2000	33.6969	6	3.15
15	79.4395	34.2461	6	3.23
20	74.8145	34.7721	6	3.30
25	70.2929	35.7475	6	3.32
30	66.6667	35.7475	6	3.33
35	63.5495	36.1932	6	3.35
40	60.8721	36.6083	6	3.36
45	58.5786	36.9911	6	3.32
50	56.6237	37.3396	6	3.32
55	54.9707	37.6520	6	3.30
60	53.5898	37.9265	6	3.27
65	52.4574	38.1617	6	3.24
70	51.5546	38.3562	6	3.21
75	50.8666	38.3562	6	3.18
80	50.3827	38.6183	6	3.17
85	50.0953	38.6844	6	3.15
90	50.0000	38.7065	6	3.14

Щоб побачити цей ефект, було розраховано розмірність SSLFSS при 3 ГГц для різних значень тета в діапазоні від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , як представлено в Таблиці 2.4. Структура також була змодельована для нормального випадку захворювання в спостерігається перехідний розв'язувач CST Microwave Studio і резонансна частота, що показано в останньому стовпчику таблиці 2.4. Для отримання варіації резонансної частоти внаслідок зміни кута падіння,  $w/\lambda$  співвідношення було зафіксовано до 0,06. З Таблиці 2.4 спостерігається, що зі збільшенням кута падіння, спочатку збільшується різниця між очікуваною резонансною частотою і імітованою з нормальною частотою, а потім зменшується. Максимальне відхилення становить близько 12% при  $40^\circ$ .

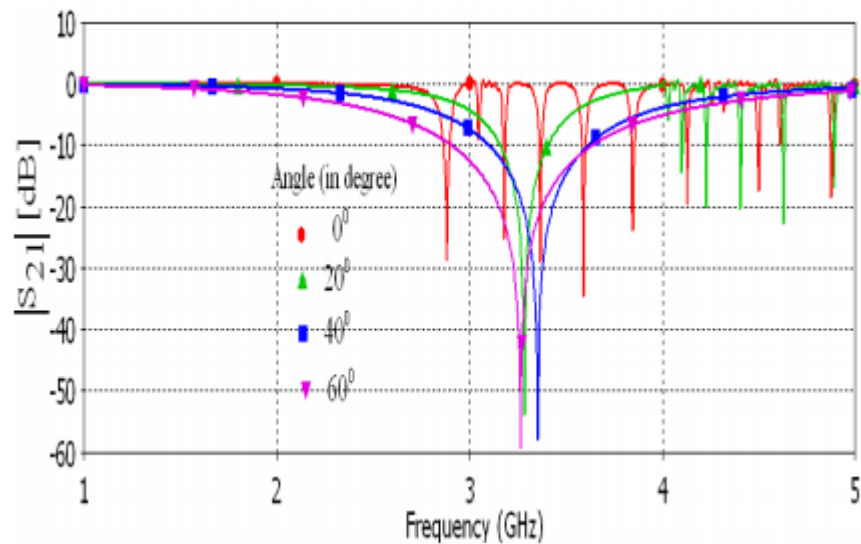


Рис. 2.3. Вплив кута падіння на параметр S21 (дБ).

Таблиця 2.5. Вплив кута на ЧСП, розрахований при 15 ГГц з 0.06 w/λ.

Angle (degree)	$p$ (mm)	$d$ (mm)	$w$ (mm)	Simulated ' $f_r$ ' (GHz)
30	13.3333	7.1495	1.2	16.7
35	12.7099	7.2386	1.2	16.83
40	12.1744	7.3217	1.2	16.82
45	11.7157	7.3982	1.2	16.78
50	11.3247	7.4679	1.2	16.68
55	10.9941	7.5304	1.2	16.56
60	10.7180	7.5853	1.2	16.41

Таблиця 2.6. Вплив кута на ЧСП, розрахований при 26 ГГц з 0.06 w/λ.

Angle (degree)	$p$ (mm)	$d$ (mm)	$w$ (mm)	Simulated ' $f_r$ ' (GHz)
30	7.6923	4.1247	0.6923	29.137
35	7.3326	4.1761	0.6923	29.224
40	7.0237	4.2240	0.6923	29.229
45	6.7591	4.2682	0.6923	29.153
50	6.5335	4.3084	0.6923	28.990
55	6.3428	4.3445	0.6923	28.79
60	6.1834	4.3761	0.6923	28.42

Теоретично, зі збільшенням кута падіння, значення  $p$  повинно зменшуватися і масив буде ставати щільно упакованим, а при меншому куті падіння масив ЧСП буде більш вільно упакований. Вплив зміни кута падіння на моделювання звичайного падіння в діапазоні  $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$  показано на рис. 2.3. З рис. 2.3 видно, що при кожному куті падіння, що використовується в цьому розрахунку, крім для  $\theta = 0^\circ$ , ЧСП резонує в діапазоні від 3 до 3,5 ГГц і показує збіжність результату. У випадку  $\theta = 0^\circ$  резонанс відбувається при 2,87 ГГц, що нижче, ніж передбачувана частота (3 ГГц), оскільки не задовольняє рівняння (12). Далі, з рис. 2.3, спостерігається, що з різним значенням кута падіння, періодичність ЧСП, розмірність петлі та ширина петлі змінюються, і це також викликає зсув резонансної частоти та її ширини смуги. На цьому шляху він допомагає вирішувати про пропускну здатність ЧСП. Далі, для перевірки теорії, результат був розрахований на 15 ГГц і 26 ГГц, і подібна поведінка спостерігалася. Спостереження в діапазоні  $30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$  показано в Таблиці 2.5 і Таблиці 2.6, відповідно.

## 2.5 Контроль коефіцієнта відбиття

У різних застосуваннях необхідно контролювати коефіцієнт відбиття до бажаного рівня на певній частоті. Загалом, не існує будь-якого прямого методу для обчислення або передбачення розмірності розміру петлі, який може задовольняти бажану умову коефіцієнта відбиття. Але оскільки параметр  $S_{11}$  пов'язаний і з резонансною частотою - бажаний рівень коефіцієнта відбиття можна отримати, просто маніпулюючи конструкцією циклу. Щоб зрозуміти метод проектування, описаний у [30-31], намалюємо параметр  $S_{11}$  петлі, що працює на частоті 3 ГГц, період ( $p$ ), розмір петлі ( $d$ ) і співвідношення " $w / \lambda$ " дорівнюють 50 мм, 38,7065 мм і 0,06 відповідно. З таблиці 4 (останній рядок) зрозуміло, що він відповідає куту набігу  $90^\circ$  і резонує в 3,14 ГГц. Параметр розсіювання ЧСП показаний на рис. 2.4.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		48

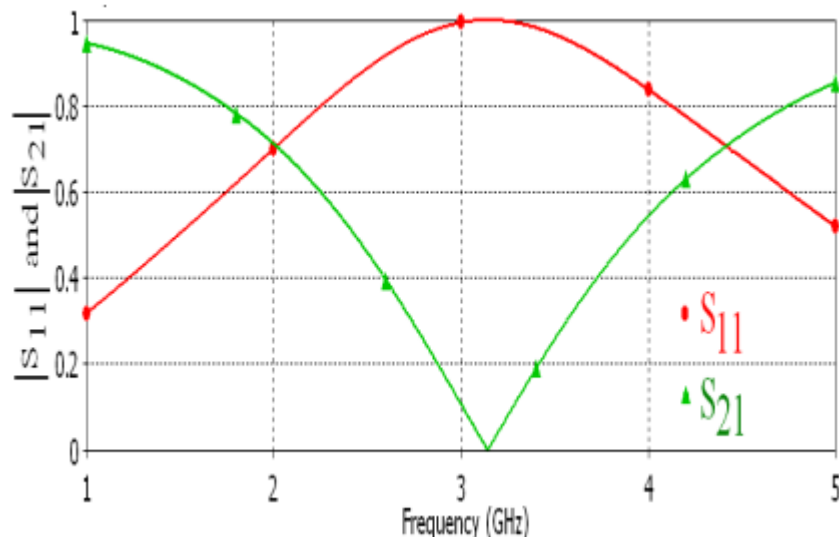


Рис. 2.4. Параметри розсіювання ЧСП довжиною петлі 38,7065 мм періоду, 50 мм і шириною 6 мм при 3 ГГц.

З рис. 2.4 показано, що структура резонує на 3,14 ГГц, а  $S_{11}$  - 0 дБ при 3,14 ГГц і в діапазоні 2,6 ГГц - 3,7 ГГц, значення  $S_{21}$  дорівнює менше -10 дБ і показує сильне відображення нормально падаючого сигналу. На лінійному масштабі ясно, що максимальне відображення відповідає  $S_{11} = 1$  при 3,14 ГГц, і це дорівнює 100% відображення. Тепер припустимо умову, в якій потрібно підтримувати значення коефіцієнта відбиття  $<100\%$  при 3,14 ГГц. Для отримання цього значення необхідно змінити геометричний параметр циклу. Однак, величина зміни залежить від площинності кривої  $S_{11}$  та її коефіцієнта згортання. Коли  $p$  і  $d$  петлі збільшуються і  $w$  смуги зменшується, смуга пропускання зупинки зменшується, а параметр  $S_{11}$  різко падає, і він не підтримує лінійність. Однак у даному випадку, як показано на Рис.4, з шириною ширини смуги, зміна параметра  $S_{11}$  будь-якої сторони резонансної частоти є лінійною, і це вказує, що для ширини смуги і меншої петлі лінійна залежність між  $|S_{11}|$  і робоча частота існує і вказує, що для зменшення коефіцієнта відбиття  $S_{11}$  до  $x\%$  при частоті  $f_r$ ,  $S_{11}$  необхідно помножити на  $x/100$  і відповідно:

$$|S_{21}| = \sqrt{1 - \left(\frac{x}{100}\right)^2} \text{ for } |S_{11}| = 1 \quad (19)$$

Для вивчення концепції лінійного збільшення або зменшення точки максимальної частоти відбиття розглянемо фундаментальне співвідношення між імпедансом ( $Z$ ) і параметрами розсіювання ( $S$ ) петлі [35].

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = Z_0 \begin{bmatrix} \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}} & \frac{2S_{12}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}} \\ \frac{2S_{21}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}} & \frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

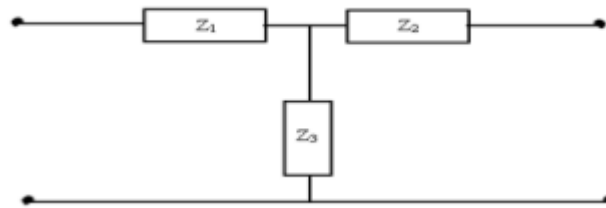


Рис. 2.5. Еквівалентна схема ЧСП на основі квадратної петлі. [35]

$Z$ -параметр перетворюється в еквівалентну Т-мережу, як показано на рис. 2.5, де  $Z_1$  і  $Z_2$  дорівнюють нулю [35]. На рис. 2.5 значення нормованого імпедансу  $Z_3$  пов'язане з моделлю еквівалентної схеми за формулою.

$$Z_3 = j \left( \frac{\omega_r L}{Z_0} - \frac{Y_0}{\omega_r C} \right) \quad (21)$$

де  $Y_0 = 1/Z_0$  і  $L$  і  $C$  еквівалентні індуктивності і ємності при  $\omega_r$ , як згадується в рівняннях (5) і (6). З рівняння (21) виявлено, що опір  $Z_3$  ЧСП прямо пропорційний індуктивності і робочій частоті і обернено пропорційний ємності. У випадку вільно упакованої ЧСП величина ємності незначна у порівнянні з індуктивністю. За цієї умови  $Z_3$  пропорційна  $\omega_r$ . В ній зазначається, що для вільно упакованого ЧСП параметр розсіювання пропорційний імпедансу ЧСП і пропорційний шанс у значенні параметра розсіювання на резонансній частоті може бути досягнуто зміною рівня імпедансу. Для цього зміна резонансної частоти петлі повинна бути збільшена на той самий коефіцієнт. На цьому шляху можливий повний контроль за параметром розсіювання. Наприклад, коли нам потрібен  $S_{11} = 10\%$  при 3 ГГц,

це вказує на те, що ЧСП, відповідний резонансу 30 ГГц, розрахований на 3 ГГц, повинен бути збільшений на  $3 \text{ ГГц} / 0,1$ . Далі, для підтримки лінійності кривої, вибираємо параметр конструювання, як показано в останньому рядку таблиці 2.4, як значення при 3 ГГц, яке дорівнює  $\theta = 90^\circ$  і  $p = 0.5\lambda$  з рівняння (12). На цьому шляху, щоб досягти 10% відображення при 3 ГГц, SSLFSS повинна бути розроблена, щоб резонувати на 30 ГГц. Для різних значень рівнів відображення результат цього процесу для управління відображенням наведено в Таблиці 2.7.

З першого і останнього стовпця Таблиці 2.7 зрозуміло, що для більш широкої смуги і вільно упакованої SSLFSS необхідна величина відбиття досягається просто масштабуванням резонансної частоти на цей фактор. Далі, перша значна цифра останнього стовпця дуже близька до необхідної величини коефіцієнта відбиття. Симульований результат  $|S_{11}|$  проти частоти показано на рис. 2.6.

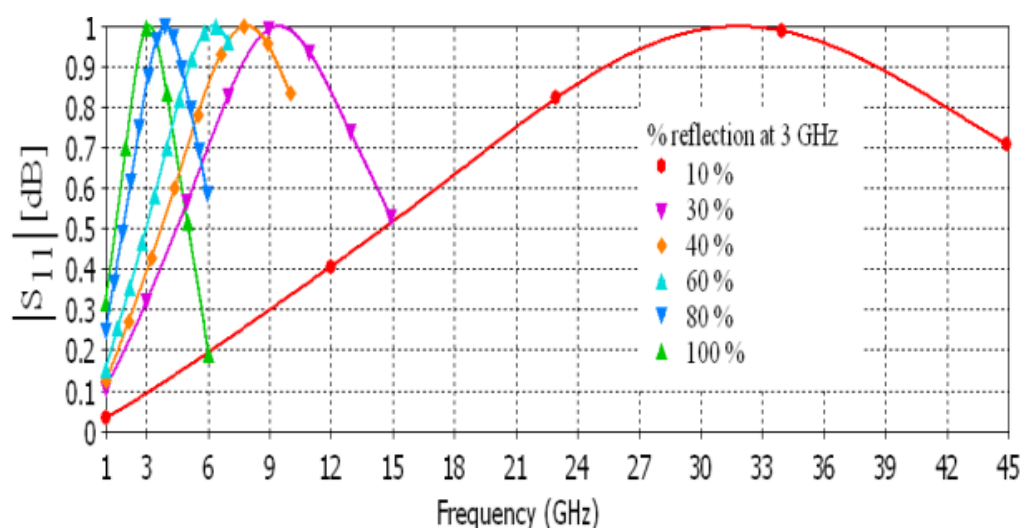


Рис. 2.6. Контроль над коефіцієнтом відбиття при 3 ГГц.



Таблиця 2.7. Контроль над коефіцієнтом відбиття при зміні розмірів.

Required $S_{11}$ at 3 GHz	SSL FSS designed to resonate at	The loop parameter for $w/\lambda = 0.06$				Simulated value of $S_{11}$ at 3 GHz (in fraction)
		$\lambda$ (mm)	$P$ (mm)	$d$ (mm)	$w$ (mm)	
0.1	30 GHz	10	5	3.8706	0.6	0.0971
0.2	15 GHz	20	10	7.7413	1.2	0.1963
0.3	10 GHz	30	15	11.6119	1.8	0.3325
0.4	7.5 GHz	40	20	15.4826	2.4	0.4078
0.5	6 GHz	50	25	19.3532	3	0.5223
0.6	5 GHz	60	30	23.2239	3.6	0.6443
0.7	4.28 GHz	70.09	35.04	27.1307	4.2	0.7696
0.8	3.75 GHz	80	40	30.9652	4.8	0.8823
0.9	3.33 GHz	90.09	45.04	34.8707	5.4	0.9658
1.0	3 GHz	100	50	38.7065	6	0.9993

З рис. 2.6 видно, що резонансна частота, отримана для різних геометричних параметрів петлі, як зазначено в колонках 5, 6 і 7 Таблиці 2.7, узгоджується з необхідною частотою резонансу, як описано в колонці 2 Таблиці 2.7. Оскільки, резонансна умова задовольняється,  $|S_{11}|$  також задовольняється при 3 ГГц. Далі, для перевірки запропонованого методу аналізу коефіцієнта відбиття на заданій частоті, процедура була повторена при 15 ГГц і отриманий аналогічний результат.

Необхідний геометричний параметр для досягнення бажаного коефіцієнта відбиття при 15 ГГц показаний в Таблиці 8, а в останньому стовпчику показано значення досягнутого коефіцієнта відбиття при 15 ГГц. Далі, структури моделювалися у вікні частоти 12–18 ГГц, як показано на рис. 2.7, а спостережуваний коефіцієнт відліку при 15 ГГц можна порівняти з бажаним. На цьому шляху робиться висновок, що для досягнення бажаного коефіцієнта відбиття на будь-якій частоті, частоту слід розділити на ту частку коефіцієнта відбиття, а нова частота виступає в якості резонансної частоти структури.

## 2.6 Контроль ширини смуги пропускання

Діапазон роботи SSLFSS в значній мірі залежить від розміру петлі та ширини петлі. Коли розмір петлі зменшується, а ширина смуги збільшується, пропускна здатність ЧСП також збільшується, а при збільшенні розміру петлі - зменшується.

Таблиця 2.8. Контроль над коефіцієнтом відбиття при зміні розмірів петлі для 15 ГГц.

Required $S_{11}$ at 15 GHz	SSL FSS designed to resonate at	The loop parameter for $w/\lambda = 0.06$				Simulated value of $S_{11}$ at 15 GHz (in fraction)
		$\lambda$ (mm)	$P$ (mm)	$d$ (mm)	$w$ (mm)	
0.1	150 GHz	2	1	0.77	0.12	0.104
0.2	75 GHz	4	2	1.54	0.24	0.200
0.3	50 GHz	6	3	2.32	0.36	0.298
0.4	37.5 GHz	8	4	3.09	0.48	0.403
0.5	30 GHz	10	5	3.87	0.60	0.511
0.6	25 GHz	12	6	4.64	0.72	0.621
0.7	21.43 GHz	13.98	6.99	5.41	0.83	0.745
0.8	18.75 GHz	16	8	6.19	0.96	0.855
0.9	16.66 GHz	17.98	8.99	6.96	1.08	0.944
1.0	15 GHz	20	10	7.74	1.2	0.993

Це вказує на те, що смуга пропускання обернено пов'язана з  $d$  і  $p$ . Незважаючи на те, що у випадку більшої петлі, смуга пропускання може додатково контролюватися зміною  $w$ . Щоб показати, вплив розміру петлі та її ширини смуги на пропускну здатність передачі / відбиття SSLFSS, було проаналізовано п'ять структур з різними параметрами на частоті 3 ГГц:

- а)  $p = 85,20$  мм,  $d = 29,38$  мм,  $w = 3$  мм,
- б)  $p = 85,20$  мм,  $d = 29,38$  мм,  $w = 6$  мм,
- в)  $p = 85,20$  мм,  $d = 33,69$  мм,  $w = 6$  мм,
- д)  $p = 66,6667$  мм,  $d = 35,7475$  мм,  $w = 6$  мм,
- е)  $p = 50$  мм,  $d = 38,7065$  мм, і  $w = 6$  мм,

де параметри, зазначені в (а) і (в), взяті з Таблиці 2.1 і (д) і (е) з Таблиці 2.4. Параметр  $S_{21}$  структур показаний на рис. 2.8. З рис. 2.8 показано, що для випадку (а) і (б) і (с), де періодичність близька до довжини хвилі, пропускна

здатність відхилення вузька. Крім того, у випадку (а) ширина смуги становить 3 мм у порівнянні з (b), де ширина смуги дорівнює 6 мм.

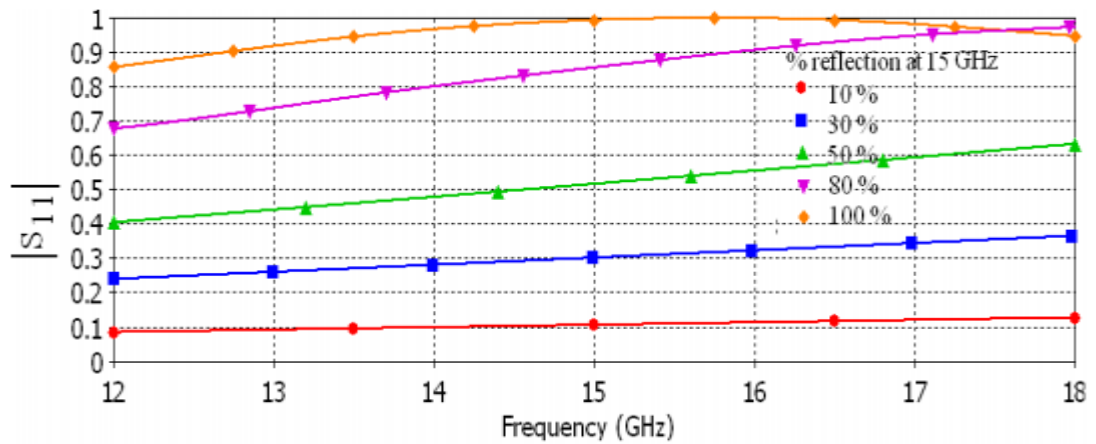


Рис. 2.7. Значення коефіцієнта відбиття в діапазоні 12–18 ГГц.

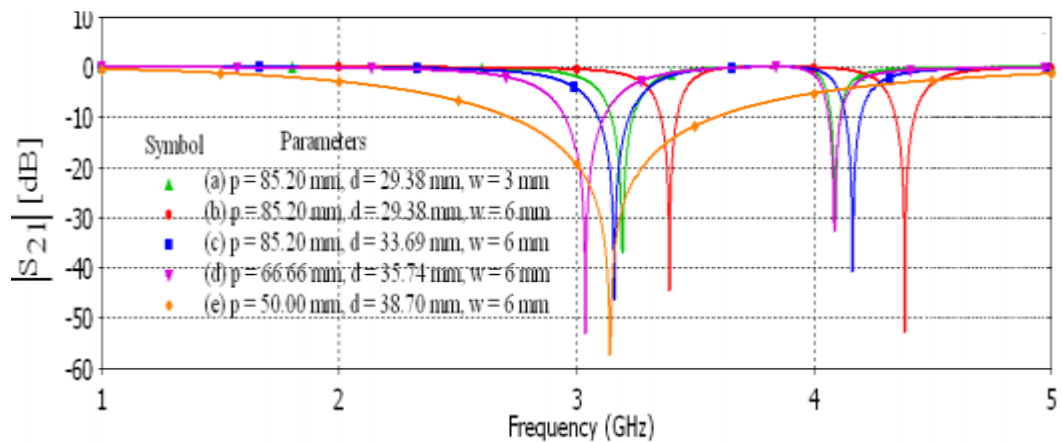


Рис. 2.8. Вплив параметрів петлі на  $|S_{21}|$  параметр.

Через зміну тільки ширини смуги резонансна частота зміщується до 3,24 ГГц з 3,14 ГГц у випадку (а). Половина смуги потужності у випадку (а) а (b) становить 7,64% і 5% відповідно. Це вказує на те, що для вузької смуги пропускання ширина смуги повинна бути збільшена, але структура резонансу на більш високій частоті. Тепер у випадку (с), зберігаючи той же  $p$  і  $w$ , що й у (b), і збільшуючи величину  $d$ , резонансна частота зміщується вниз і це відбувається за рахунок зменшення коефіцієнта якості, який був зменшений за

рахунок зміна значення індуктивності, де індуктивність пов'язана з шириною смуги. У випадку (с) частота  $f_r$  і -3 дБ дробова смуга пропускання (fractional bandwidth or FBW) дорівнює 3.11 ГГц і 8.66% відповідно. У випадку (d) і (e) періодичність  $p$  і розмір петлі  $d$  були зменшені і збільшені відповідно, при цьому константа ширини смуги дорівнює 6 мм. Зі зменшенням періодичності збільшується пропускна здатність відхилення, що видно з рис. 2.8. Таким чином, петля меншого розміру може бути використана для збільшення межі відхилення смуги, яка була б широкою смугою відхилення. Іншим важливим явищем є вплив  $p$  на резонансний стан структури. Якщо періодичність близька до довжини хвилі, то досягаються множинні резонанси і можуть бути використані при проектуванні подвійної частотно-селективної поверхні, а для широкої смуги відхилення потрібна менша петля.

## 2.7 Моделювання ЧСП з підстроюванням на основі MEMS структури

Розраховані ЧСП на основі метаматеріального патча у формі квадратна петля можливо використати у розробці ЧСП з підстроюванням на основі декількох методів. Серед них є підстроювання на основі MEMS структур, що змінюють положення кожної комірки ЧСП відносно іншої на деякий кут нахилу (skew angle) [36].

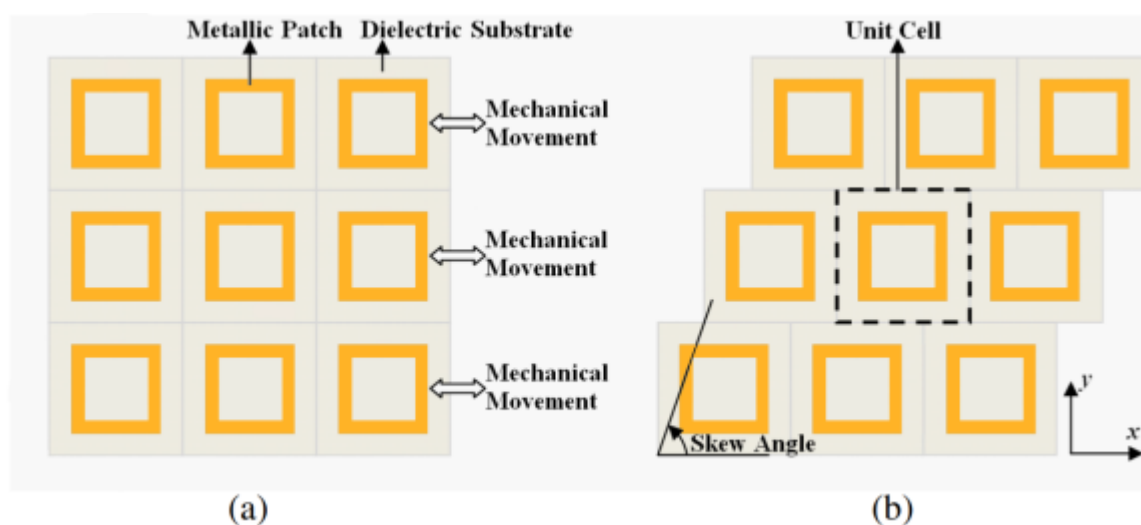


Рис. 2.9. Модель і принцип дії ЧСП з підстроюванням на основі MEMS структури.

Принцип дії полягає у зміні горизонтального положення кожної комірки на деяку фіксовану відстань відносно ряду комірок нижче. Внаслідок цього, змінюється резонансна частота ЧСП, оскільки вона залежить в основному від геометрії поверхні і патча з металу.

Положення цих комірок можливо змінювати за допомогою MEMS структур, але є суттєвий мінуси - відносна складність конструювання такої поверхні, і неможливість реалізації багатошарової ЧСП. Також, внаслідок малої швидкості зміни положення комірок - буде страждати і швидкість зміни резонансної частоти. Ця проблема повністю вирішується наступним методом підстроювання.

## 2.8 Моделювання ЧСП з підстроюванням на основі PIN діодів

Підстроювання ЧСП можливо також реалізувати за допомогою PIN діодів.

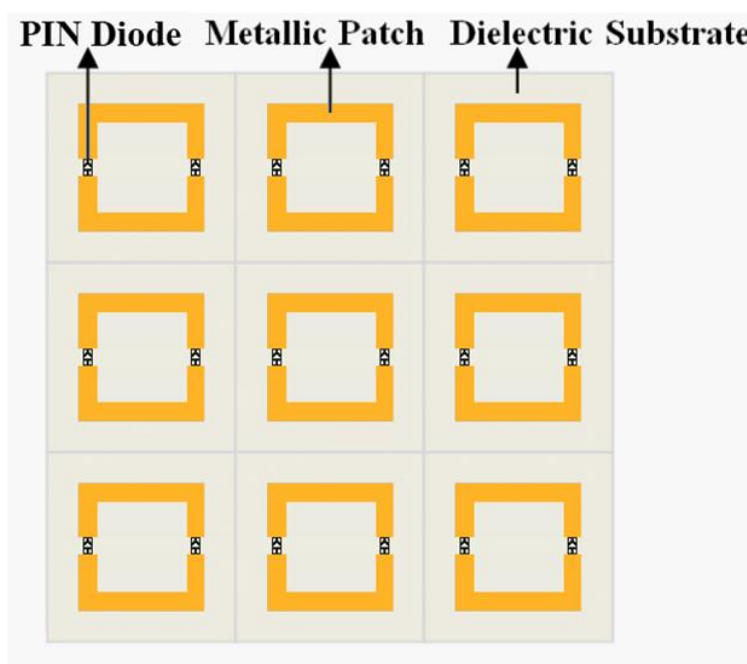


Рис. 2.10. Модель і принцип дії ЧСП з підстроюванням на основі PIN діодів.

Підстроювання даного варіанту ЧСП відбувається за допомогою двох діодів, які мають два стани: ON та OFF. При увімкнених діодах вони працюють як коротке замикання, і внаслідок цього дві частини патча з'єднуються. А коли діоди вимкнені - вони ведуть себе як розімкнутий контур, і кожна частина патча працює окремо. Через існування цих двох станів, густина струму у патчі буде змінюватися в залежності від стану діода, що призводить до кардинальної зміни резонансної частоти.

Даний варіант підстроювання простий у конструюванні, але вимагає ще одного шару провідника у структурі, для керування діодами. Така конструкція дешевша ніж MEMS структура, і у неї є суттєвий плюс - вона працює дуже набагато швидше.

Також, у одній системі можливо реалізувати одночасно два цих методи підстроювання, і опираючись на дані [36-37] праці, можливо зробити висновок, що за допомогою PIN діодів можливо досягти значної і різкої зміни резонансної частоти, коли як за допомогою MEMS структури - зміна частоти буде більш меншою і плавною.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
						57
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		

## Висновки:

У даному розділі дипломного проекту було розраховано низку різних дизайнів ЧСП на основі метаматеріальної комірки виду «квадратна петля». Була досліджена залежність основних параметрів ЧСП від геометричних розмірів комірки. А саме, було досліджено вплив кута падіння на ЧСП, розраховано геометричні розміри ЧСП для отримання окремих бажаних коефіцієнтів відбиття і розраховано залежність ширини смуги пропускання від геометричних розмірів ЧСП.

Також були запропоновані методи для інтеграції підстроювання у розраховані ЧСП на основі MEMS структур та на основі PIN діодів.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
						58
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		

### 3 ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУЮВАННЯ МЕТАМАТЕРІАЛІВ

#### 3.1 Технологія конструювання одношарових метаматеріалів

У даній частині будуть розглянуті питання технології виготовлення мікрохвильових (НВЧ) метаматеріалів з регулярно-періодичною дискретною структурою типу решітки.

Очевидно, що вибір технології залежить від наступного:

- розмірів структурних елементів метаматеріала,
- загальних розмірів зразка,
- роду вихідних матеріалів, використовуваних в технології,
- механічних вимог до конструкції (жорсткість, міцність і т.д.),
- умов експлуатації.

Якщо нас цікавить виробництво зразків для лабораторних досліджень, то найбільш важливими є перші три фактори плюс помірні вимоги до жорсткості і міцності конструкції. Ці обставини і будемо враховувати при описі існуючих лабораторних технологій.

Отже, розміри структурних елементів метаматеріалів ГГц діапазону складають десяті частки - одиниці міліметрів. Загальні розміри зразків повинні бути порядку 10-20 см. Матеріал, з якого треба виготовляти проводять структурні елементи - метал (мідь, алюміній і ін.) З можливим покриттям сріблом для зниження поверхневого опору або золотом для захисту від корозії. Діелектричний матеріал - полімери з мінімальними втратами і щільністю.

Історично перші метаматеріали представляли собою об'ємні конструкції з натягнутих дротів або розподілених в просторі невеликих дискретних елементів у вигляді кульок, кілець, спіралей, відрізків дротів і трубок. В якості системи з натягнутими дротами можна застосувати іскрову камеру для детектування частинок, а спіралі можна отримати шляхом навивки дроту на стрижні квадратного перетину, які потім можна складувати в заданому порядку [38]. Для фіксації цих елементів в просторі, заготовку можна залити

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		59



відповідним піноутворюючим полімером. Подібний підхід годиться для збірки метаматеріала нескладної конфігурації з однорідних елементів, але в разі складання з осередків, що містять різнорідні елементи (наприклад, відрізки дроту і кільця), виникає проблема взаємної орієнтації і їх фіксації в просторі. Ця проблема ускладнюється при виготовленні 2D структур і стає важкою при виготовленні 3D структур.

Інший підхід заснований на застосуванні блоків з твердого полімеру, на межі якого механічно наносяться (зокрема, шляхом приклеювання) елементи елементарних осередків. Наприклад, в роботі [39] полімерні блоки представляли собою листи товщиною 3 мм, на поверхні яких закріплювалися тонкі зволікання з позолоченого вольфраму, що утворюють 1D ґрати; потім клавши один на одного листи з поворотом на  $90^\circ$ , отримували багатошарову 2D ґратку.

Для нанесення елементів на поверхню полімерних блоків можна застосувати струменевий друк з використанням металевих чорнил [40]. При цьому вдасться частково механізувати процес виробництва за рахунок друку планарних резонаторів відразу в один прийом на великій кількості заготовок. Розпилюючи блоки після роздруківки однієї грані і відповідним чином переорієнтувати їх перед новою печаткою, можна досить швидко виготовити кубічні ґрати з великої кількості осередків [40].

Розглянемо кілька варіантів виробництва метаматеріалів, елементарні осередки яких містять провідники для електричної реакції і резонатори типу SRR - кільце з розрізом - для магнітної реакції.

У першому варіанті провідники і кільцеві резонатори SRR виготовляються з фольги друкованих плат з використанням стандартної техніки оптичної фотолітографії з хімічним травленням фольгового шару. При необхідності також наноситься гальванічним методом захисне покриття на базовий фольговий шар. При цьому малюнок елементарних осередків наноситься на всю поверхню заготовки в один прийом.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
						60
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		

Крім фотолітографії для отримання малюнка застосовують мікрофрезування фольги, яка виконується на верстаті з програмним управлінням, або замість механічного видалення фольги з допомогою різця використовують лазерний різак. В останньому випадку потрібно ретельне видалення з поверхні підкладки вуглецевого шару, який утворюється при випаровуванні її матеріалу променем лазера, інакше зникає ефект негативного заломлення через сильний зростання втрат в метаматеріалів [41].

Як правило, провідники і кільцеві резонатори розміщуються по різні боки діелектричної підкладки, але навпроти один одного. У тих випадках, коли матеріал підкладки досить крихкий, і двостороннє мікрофрезування може привести до розтріскування підкладки, використовують підкладки з односторонньою металізацією. На одних підкладках виготовляють провідники, на інших - подвійні кільцеві резонатори SRR. Потім різномірні підкладки туляться один до одного, а між парами притиснутих підкладок розташовуються пластини-спейсери з діелектрика потрібної товщини.

Оскільки резонатори SRR у вигляді двох кілець з розрізом одночасно реагують на електричний і магнітний компоненти поля, в деяких випадках немає потреби в окремих провідникових елементах, і резонатори виготовляють на друкованій платі з односторонньою металізацією. В такому випадку доцільно застосувати мікрофрезування фольги для отримання малюнка, так як цей метод дозволяє додатково зрізати діелектричну підкладку з метою коригування параметрів елементарної комірки [42].

Отримані заготовки друкованих плат з нанесеним малюнком струмопровідних шарів розрізаються відповідним чином і збираються хрест-навхрест в конструкції типу ящиків для зберігання пляшок, тобто в квадратно-стілникові структури. Якщо бажано підвищити жорсткість зібраних структур, їх заливають пінополімером. Потім отриманий моноблок можна розрізати або фрезерувати для додання йому необхідної форми.

У другому варіанті застосовують технологію багатошарових друкованих плат: провідники і окремі частини кільцевих резонаторів виготовляють з фольги на діелектричних підкладках, а решту резонаторів виконують шляхом металізації внутрішньої поверхні отворів в діелектриках друкованих плат [43].

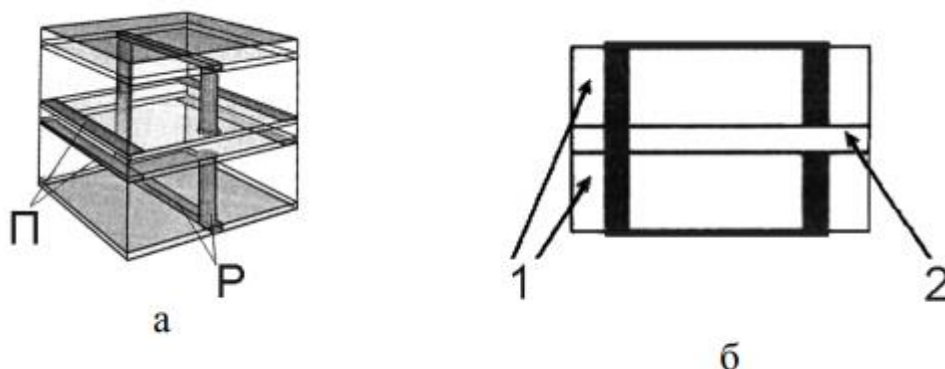


Рис. 3.1. Елементарна комірка метаматеріала типу "Провідники + кільце з розрізом", виготовлена за технологією багатошарових друкованих плат. горизонтальні провідники виготовлені з фольгових шарів, а вертикальні стрижні - з шарів металізації усередині отворів в платах; а - загальний вигляд (П - провідники, Р - частини кільцевого резонатора), б - перетин в площині резонатора "кільце з розрізом" (1 - товсті діелектричні плати, 2 - тонка діелектрична плата) [43].

На рис. 3.1(а) представлена загальна структура елементарної осередки метаматеріала, а на рис. 3.1(б) - поперечний переріз структури в площині SRR-резонатора [43]. Кожна клітинка містить 2 пари провідників (П), виконаних з фольги і розділених тонким діелектриком. Горизонтальні плечі кільцевого резонатора квадратної форми (Р) також виконані з фольги. З ними контактують вертикальні стрижневі частини резонатора кільця. Ці частини обложіні всередині отворів, просвердлені в діелектриках. Лівий отвір на рис. 3.1(б) проходить через все діелектричні плати, і на його стінках хімічно осідає метал для формування довгого стрижня кільця резонатора. Справа отвори просвердлені тільки в товстих діелектричних платах (1), і на їхніх стінках також обложіний метал для формування двох коротких стрижнів кільцевого резонатора. Торці коротких стрижнів, розділені тонкою діелектричною платою

(2), утворюють конденсатор кільцевого резонатора. Всі плати, з яких зібраний метаматеріал, склеюються між собою.

Загальна висота даного резонатора становить близько 2,4 мм, відстань між стрижнями - близько 2,5 мм, зовнішній діаметр стрижнів - 0,26 мм, зазор між стрижнями - 0,32 мм. На частоті 8,5 ГГц був отриманий показник заломлення  $n = -5$ . Таким чином, завдяки застосуванню стандартних прийомів технології друкованих плат вдалося істотно спростити процес виготовлення подібного метаматеріала. У наступному розділі будуть розглянуті питання технології виготовлення метаматеріалів ТГц діапазону аж до області видимого світла.

### **3.2 Технологія конструювання багат шарових метаматеріалів**

Оскільки у попередньому розділі мова йшла про одношарові зразки (тобто про 2D матеріали), досить було обмежитися технологією, заснованої на електронно-променевої літографії і електронно-променевому випаровуванні металу, щоб отримати візерунок з резонаторів на плоскій діелектричній підкладці. Електронно-променева літографія виконувалася за методом "вибухової" (lift-off) літографії, при якій метал наносився випаровуванням електронним променем на малюнок з електрорезисту, а потім резист видалявся шляхом розчинення разом з лежачим на ньому металом. Таким чином, метал залишався на підкладці тільки в місцях, не покритих резистом. Подібний підхід був реалізований і при виготовленні чотиришарового зразка метаматеріала на основі резонаторів з розрізаних кілець, описаного в [44], але в даному випадку здійснювалося послідовне осадження одного 2D шару з SRRs на інший з утворенням в результаті 3D структури. Аналогічна технологія осадження п'ятишарових структур також застосовувалася для виготовлення фотонних кристалів із забороненою фотонної зоною [45]. Очевидно, що в даному випадку також потрібно вирішити проблеми планаризації, відділення шарів один від одного діелектриком і суміщення малюнків всіх шарів. Тут

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		63

планаризація - це процедура вирівнювання верхньої поверхні матеріалу за допомогою додаткового діелектричного шару.

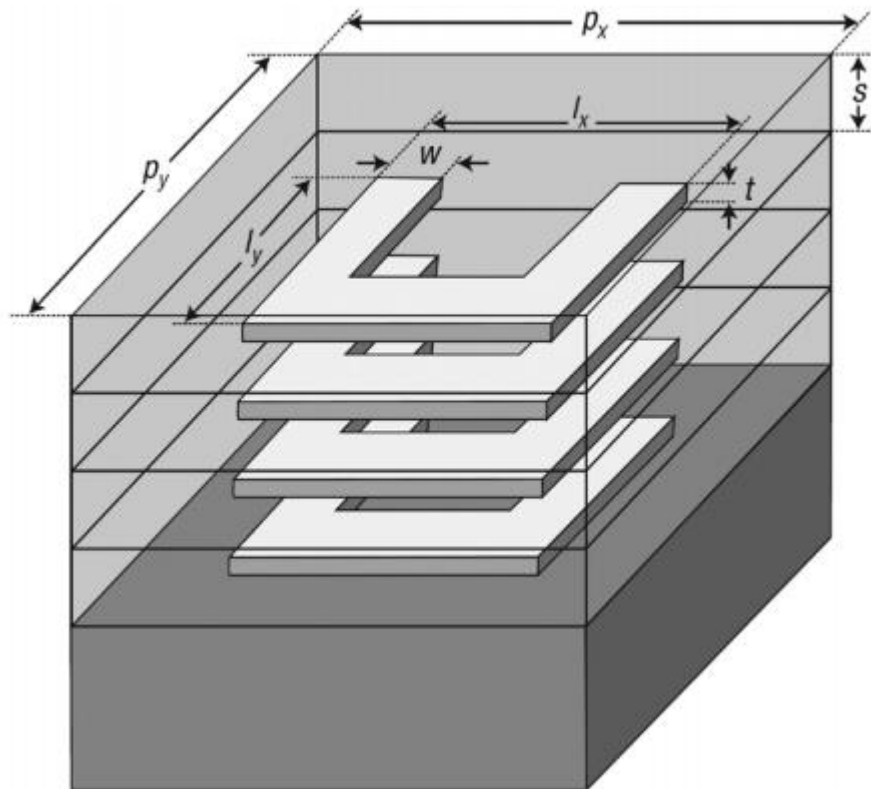


Рис. 3.2. Структура елементарної комірки з 4-х шарів резонаторів U-подібної форми з розмірами:  $l_x = 430$  нм,  $l_y = 380$  нм,  $w = 80$  нм,  $t = 20$  нм,  $s = 70$  нм,  $p_x = 700$  нм,  $p_y = 700$  нм [44]

В іншому випадку нерівності поверхні, викликані виступами металевих SRRs, будуть перешкоджати послідовному нашаруванню малюнків. На рис. 3.2 представлена геометрична структура елементарної осередки такого чотиришарового метаматеріала, що складається з резонаторів U-подібної форми.

Отже, технологічний процес виготовлення багатошарового метаматеріала полягав у наступному (див. Рис. 3.3). Спочатку на підкладці з кварцового скла створювали систему з 3-х або більше маркерів розміром  $4 \times 100$  мкм<sup>2</sup> із золотої плівки товщиною 250 нм за допомогою вибухової літографії. Ці маркери потрібні були для виконання процедури позиціонування підкладки перед експозицією (опроміненням електронно-резисту) електронним променем. Обрана товщина маркерів дозволяла чітко їх розрізняти в процесі

нанесення декількох шарів. В даному випадку похибка суміщення малюнків окремих шарів не перевищувала 10 нм.

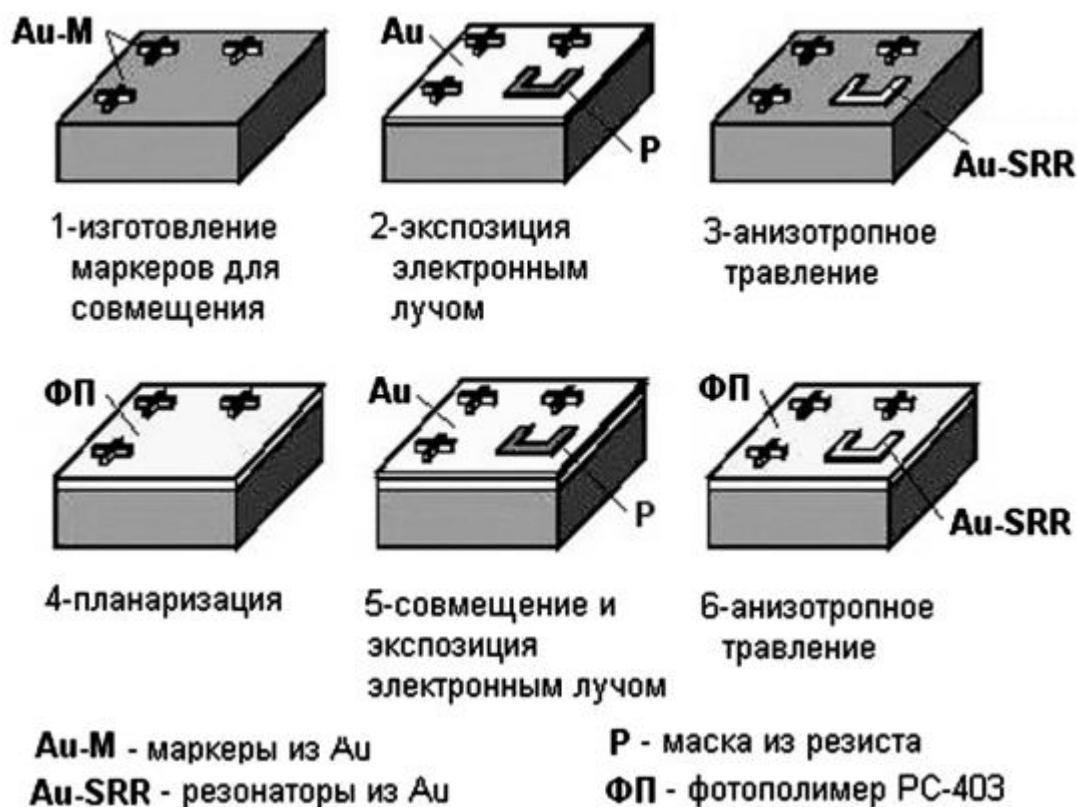


Рис. 3.3. Схема технологічного процесу виготовлення багатошарового метаматеріала з резонаторами U-подібної форми [44].

Потім підкладка покривалася послідовно шарами золота товщиною 20 нм за допомогою електронно-променевого випаровування і негативним електронно-резистом. Після опромінення електронним променем на шарі золота формувалася за стандартною процедурою маска з резисту (позиція 2 на рис. 3.3). Наступний етап - іонно-променеве розпорошення (анізотропне травлення іонами  $Ar^+$ ) золота для отримання під резистом конфігурації SRRs. Після видалення резисту отримуємо малюнок на підкладці з кільцевих резонаторів (позиція 3 на рис. 3.3). Після літографії виконувалася планарізація шляхом нанесення центрифугою шару фотополімера PC403 товщиною 70 нм. Завдяки термообробці полімер твердне і використовується в подальшому в якості діелектрика-спейсера, що розділяє шари з SRRs (позиція 4 на рис. 3.3). Потім багато разів повторюються процеси нанесення золота, електронної літографії і планарізації. Останній захисний шар - з полімеру PC403. Зразки

метаматеріала створювалися на поверхні підкладки площею  $200 \times 200$  мкм<sup>2</sup>. Для того, щоб коректно поєднувати малюнки окремих шарів, потрібно оновлення поверхні маркерів (для збереження їх розмірів). Для цього вводилася процедура видалення полімерного шару PC403 з поверхні маркерів за допомогою травлення в кисневій плазмі з використанням тіньової маски для захисту іншої поверхні структури. В результаті полімер віддалявся тільки з поверхні маркерів. Другий можливий варіант обробки маркерів, придатний для нарощування великої кількості шарів з SRRs або навіть для отримання об'ємного метаматеріалу, полягає в додатковому дорошкуванні шару золота на маркери одночасно з формуванням малюнка SRRs на кожному окремому шарі. У цьому варіанті поверхню маркерів НЕ буде піддаватися багаторазовому іонного і плазмовому травленню.

Рис. 3.4 показує зовнішній вигляд (електронні мікрографії) виготовленого метаматеріала і реальні розміри його структурних елементів. Як видно, отримана багатошарова структура з хорошим поєднанням малюнків SRR-резонаторів сусідніх шарів.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ докум.	Підпис	Дата		66

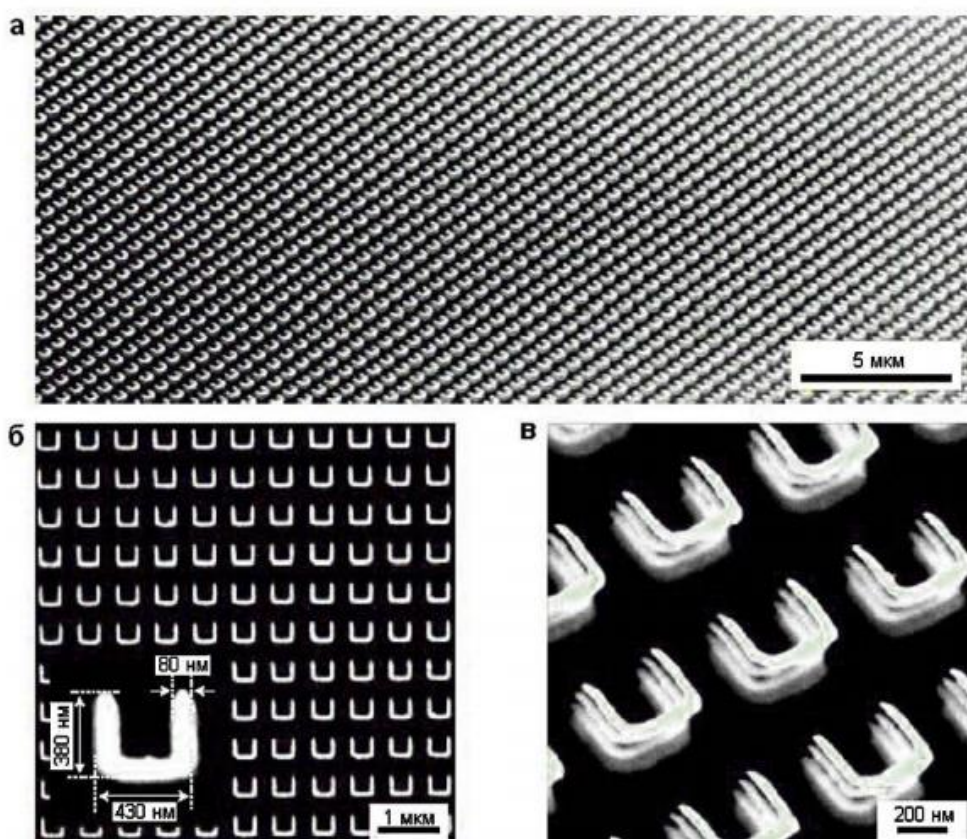


Рис. 3.4. Зображення чотиришарового метаматеріалу з резонаторами U-подібної форми, отримані за допомогою електронного скануючого мікроскопа. Вставка на рис. "Б" показує реальні розміри SRR. Адаптовано з [44]



## Висновки:

У даному розділі були проаналізовані методи технології метаматеріалів. За допомогою описаних способів конструювання можливо створити 2D і 3D структури метаматеріалів, які мають застосування у різних частотних діапазонах.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ доквм.	Пілпис	Лата		68

## Висновки:

У даному бакалаврському проекті було розроблено частотно-селективні поверхні при трьох резонансних частотах: 3 ГГц, 15 ГГц та 26 ГГц. Було розглянуто застосування технології СТЕЛС у повсякденному житті, а також методи до реалізації цієї технології за допомогою частотно-селективних поверхонь на основі метаматеріалів.

Всього було розглянуто 4 методи на основі сучасних досліджень: сферичне маскування на основі електродинаміки трансформації, неевклідове трансформаційне маскування, килимове маскування і мантийне маскування.

Також були розглянуті методи для підстроювання даних частотно-селективних поверхонь, а саме метод з використанням плазми та MEMS структури.

Було розраховано геометричні розміри ЧСП при трьох резонансних частотах, а також показано залежність розмірів від бажаного кута падіння випромінювання і від коефіцієнту відбиття. Далі було запропоновано два методи для підстроювання розрахованих поверхонь – за допомогою PIN діодів та за допомогою MEMS структур.

Було розглянуто технологічні деталі щодо створення 2D і 3D метаматеріальних структур.

## Список літератури:

1. Frequency Selective Surfaces. (2005). In K. Chang (Ed.), Encyclopedia of RF and Microwave Engineering (p. 133). doi:10.1002/0471654507.eme133
2. J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, Controlling electromagnetic fields, Science 312, 1780 (2006).
3. D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies, Science 314, 977 (2006)
4. U. Leonhardt and T. Tyc, Broadband invisibility by nonEuclidean cloaking, Science 323, 110 (2009).
5. J. Li and J. B. Pendry, Hiding under the Carpet: A New Strategy for Cloaking, Phys. Rev. Lett. 101, 203901 (2008).
6. J. C. Halimeh, T. Ergin, J. Mueller, N. Stenger, and M. Wegener, Photorealistic images of carpet cloaks, Opt. Express 17, 19328 (2009).
7. B. Zhang, T. Chan, and B.-I. Wu, Lateral Shift Makes a Ground-Plane Cloak Detectable, Phys. Rev. Lett. 104, 233903 (2010).
8. Y. Luo, J. Zhang, H. Chen, L. Ran, B.-I. Wu, and J. A. Kong, A rigorous analysis of plane-transformed invisibility cloaks, IEEE Trans. Antennas Propag. 57, 3926 (2009).
9. S. Xi, H. Chen, B.-I. Wu, and J.-A. Kong, One-directional perfect cloak created with homogeneous material, IEEE Microwave Wireless Compon. Lett. 19, 131 (2009).
10. X. Chen, Y. Luo, J. Zhang, K. Jiang, J. B. Pendry, and S. Zhang, Macroscopic invisibility cloaking of visible light, Nat. Commun. 2, 176 (2011).
11. D. Liang, J. Gu, J. Han, Y. Yang, S. Zhang, and W. Zhang, Robust large dimension terahertz cloaking, Adv. Mater. 24, 916 (2012).
12. B. Zhang, Y. Luo, X. Liu, and G. Barbastathis, Macroscopic Invisibility Cloak for Visible Light, Phys. Rev. Lett. 106, 033901 (2011).

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
						70
ЗМН	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		

13. N. M. Estakhri, C. Argyropoulos, and A. Alù, Graded metascreens to enable a new degree of nanoscale light management, *Phil. Trans. R. Soc. A* 373, 20140351 (2015).
14. N. M. Estakhri and A. Alù, Ultra-thin unidirectional carpet cloak and wavefront reconstruction with graded metasurfaces, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 13, 1775 (2014).
15. A. Alù, Mantle cloak: Invisibility induced by a surface, *Phys. Rev. B* 80, 245115 (2009).
16. B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* (John Wiley & Sons, New York, 2005).
17. S. Tretyakov, *Analytical Modeling in Applied Electromagnetics* (Artech House, Boston, 2003).
18. J. C. Soric, P. Y. Chen, A. Kerkhoff, D. Rainwater, K. Melin, and A. Alù, Demonstration of an ultralow profile cloak for scattering suppression of a finite-length rod in free space, *New J. Phys.* 15, 033037 (2013).
19. Y. R. Padooru, A. B. Yakovlev, P.-Y. Chen, and A. Alù, Analytical modeling of conformal mantle cloaks for cylindrical objects using sub-wavelength printed and slotted arrays, *J. Appl. Phys.* 112, 034907 (2012).
20. P.-Y. Chen and A. Alù, Atomically thin surface cloak using graphene monolayers, *ACS Nano* 5, 5855 (2011).
21. P. Alitalo, O. Luukkonen, L. Jylha, J. Venermo, and S. A. Tretyakov, Transmission-line networks cloaking objects from electromagnetic fields, *IEEE Trans. Antennas Propag.* 56, 416 (2008).
22. P. Alitalo, O. Luukkonen, L. Jylha, J. Venermo, and S. A. Tretyakov, Correction to “Transmission-line networks cloaking objects from electromagnetic fields” [Feb 08 416–424], *IEEE Trans. Antennas Propag.* 56, 918 (2008).
23. S. Tretyakov, P. Alitalo, O. Luukkonen, and C. Simovski, Broadband Electromagnetic Cloaking of Long Cylindrical Objects, *Phys. Rev. Lett.* 103, 103905 (2009).

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
						71
ЗМН	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		

24. P. Alitalo and S. A. Tretyakov, Electromagnetic cloaking of strongly scattering cylindrical objects by a volumetric structure composed of conical metal plates, Phys. Rev. B 82, 245111 (2010).

25. G. W. Milton and N.-A. P. Nicorovici, On the cloaking effects associated with anomalous localized resonance, Proc. R. Soc. A 462, 3027 (2006).

26. G. W. Milton, N.-A. P. Nicorovici, R. C. McPhedran, and V. A. Podolskiy, A proof of superlensing in the quasistatic regime, and limitations of superlenses in this regime due to anomalous localized resonance, Proc. R. Soc. A 461, 3999 (2005).

27. R. Fleury and A. Alù, Cloaking and invisibility: A review, FERMAT 1, 7 (2014).

28. Zendejas, J.M. et al. "Magnetic MEMS Reconfigurable Frequency-Selective Surfaces." Journal of Microelectromechanical Systems 15.3 (2006): 613-623.

29. Komlan Payne, et al. "Plasma-Enabled Adaptive Absorber for High-Power Microwave Applications" 2007 IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, 2018.

30. Wu, T. K., Frequency Selective Surfaces and Grid Array, John Wiley and Sons, New York, 1995.

31. Munk, B. A., Frequency Selective Surfaces: Theory and Design, John Wiley and Sons, New York, 2000.

32. Pirahadi, A., F. Keshmiri, M. Hakkak, and M. Tayarani, "Analysis and design of dual band high directivity EBG resonator antenna using square loop FSS as superstrate layer," Progress In Electromagnetics Research, Vol. 70, 1–20, 2007.

33. Mittra, R., C. H. Chan, and T. Cwik, "Techniques for analyzing frequency selective surfaces a review," Proc. IEEE., Vol. 76, No. 12, 1593–1615, 1988.

34. Marcuwitz, N., Waveguide Handbook, McGraw-Hill, 1st Edition, New York, 1951.

35. Pozar, D. M., Microwave Engineering, 2nd Edition, John Wiley and Sons, NY, USA, 1998.

36. Design of novel reconfigurable frequency selective surfaces with two control techniques

37. A Wideband Frequency Tunable FSS for Electromagnetic Shielding Applications

38. Pendry J.B., Holden A.J., Stewart W.J., Youngs I. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures // Phys. Rev. Lett. – 1996. – Vol. 76. – No. 25. – P. 4773-4776.

39. Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Stewart W.J. Low frequency plasmons in thin-wire structures // J. Phys.: Condens. Matter. 1998. – Vol. 10. – P. 4785-4809.

40. Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Stewart W.J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1999. – Vol. 47. – No. 11. – P. 2075-2084.

41. Houck A.A., Brock J.B., Chuang I.L. Experimental observations of a left-handed material that obeys Shell's law // Phys. Rev. Lett. – 2003. – Vol. 90. – No. 13. – P. 137401(1-4).

42. Smith D.R., Mock J.J., Starr A.F., Schurig D. Gradient index metamaterials // Phys. Rev. E. – 2005. – V. 71. – P. 036609 (1-6).

43. Starr A.F., Rye P.M., Smith D.R., Nemat-Nasser S. Fabrication and characterization of a negative-refractive-index composite metamaterials // Phys. Rev. B. – 2004. – V. 70. – P. 113102(1-4)

44. Liu N., Guo H., Fu L. et al. Three-dimensional photonic metamaterials at optical frequencies // Nature Materials. – 2008. – Vol. 7. – No. 1. – P. 31–37.

45. Chang A.S.P., Kim Yo.S., Chen M. et al. Visible three-dimensional metallic photonic crystal with non-localized propagating modes beyond waveguide cutoff // Opt. Exp. – 2007. – Vol. 15. – No. 13. – P. 8428-8437.

					БР.6.050802.051.011 ПЗ	Анк
						73
ЗМН	Анк	№ док.м.	Підпис	Дата		